

**Е. Н. КАЗАНЦЕВ**

# **ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПЕЧИ**

***Справочное руководство  
для расчетов  
и проектирования***

**ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ  
ДОПОЛНЕННОЕ И ПЕРЕРАБОТАННОЕ**

*Допущено Министерством высшего и среднего  
специального образования СССР  
в качестве учебного пособия для студентов  
металлургических специальностей вузов*



**МОСКВА «МЕТАЛЛУРГИЯ» 1975**

УДК 669.041.(075.8)

**Промышленные печи.** *Справочное руководство для расчетов и проектирования.* 2-е издание, дополненное и переработанное, Казанцев Е. И. М., «Металлургия», 1975. 368 с.

Приведены характеристики теплофизических свойств газов, жидкостей, металлов и твердых веществ, применяемых в черной и цветной металлургии, коксохимии и других отраслях промышленности, изложены сведения, необходимые при расчетах печей различных типов, о разных топливах и их сжигании, механике газов, передаче тепла, нагреве и охлаждении тел, материалах печей и пр.

Справочник предназначен в качестве учебного пособия для студентов металлургических, энергетических и машиностроительных вузов и инженерно-технических работников предприятий, проектно-конструкторских организаций и научно-исследовательских институтов, работающих в области газопечной теплотехники. Ил. 204. Табл. 194. Список лит.: 17 назв.

© Издательство «Металлургия», 1975

31011\*—176  
К ————— 143—75  
040(01)—75

\* Книга имеет второй книго-торговый индекс — 30304.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                          |   |
|------------------------------------------|---|
| Предисловие ко второму изданию . . . . . | 6 |
|------------------------------------------|---|

### *Раздел первый*

#### **ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ**

|                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Глава I. Теплофизические свойства газов . . . . .                                                       | 10  |
| Глава II. Теплофизические свойства жидкостей . . . . .                                                  | 32  |
| Глава III. Теплофизические свойства веществ, металлов<br>и их сплавов . . . . .                         | 44  |
| Глава IV. Теплофизические свойства сталей и чугунов                                                     | 61  |
| Классификация сталей . . . . .                                                                          | 61  |
| Обозначения марок сталей . . . . .                                                                      | 62  |
| Теплопроводность сталей . . . . .                                                                       | 64  |
| Расчетный метод определения теплопроводности сталей . . . . .                                           | 67  |
| Теплофизические свойства сталей по данным<br>различных исследований . . . . .                           | 70  |
| 1. Углеродистые стали . . . . .                                                                         | 71  |
| 2. Низколегированные стали . . . . .                                                                    | 78  |
| 3. Хромистые нержавеющие стали . . . . .                                                                | 88  |
| 4. Хромоникелевые аустенитные стали . . . . .                                                           | 95  |
| 5. Высоколегированные стали . . . . .                                                                   | 102 |
| 6. Стали для отливок . . . . .                                                                          | 107 |
| 7. Чугуны . . . . .                                                                                     | 107 |
| Глава V. Механические свойства сталей и сплавов . . . . .                                               | 111 |
| Глава VI. Теплофизические свойства технических и огнеупорных материалов и огнеупорных изделий . . . . . | 117 |
| Технические материалы . . . . .                                                                         | 117 |
| Классификация огнеупорных изделий . . . . .                                                             | 127 |
| Маркировка огнеупорных изделий . . . . .                                                                | 130 |
| Свойства огнеупорных изделий . . . . .                                                                  | 131 |
| Теплоизоляционные материалы . . . . .                                                                   | 149 |

### *Раздел второй*

#### **ТОПЛИВО И ЕГО СЖИГАНИЕ**

|                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Глава VII. Физико-химические свойства топлива . . . . .                                    | 157 |
| Газообразные топлива . . . . .                                                             | 157 |
| Технические условия на «сжатые газы» (по<br>ГОСТ 6763—53) . . . . .                        | 171 |
| Технические условия на сжиженный углеводородный топливный газ (по ГОСТ 10196—62) . . . . . | 171 |
| Жидкие топлива . . . . .                                                                   | 172 |
| Твердые топлива . . . . .                                                                  | 179 |
| Качества ископаемых углей и горючих<br>сланцев СССР . . . . .                              | 179 |
| Кокс . . . . .                                                                             | 181 |
| Глава VIII. Сжигание топлива . . . . .                                                     | 187 |
| Теплота сгорания топлива . . . . .                                                         | 187 |
| Температуры при сжигании топлив . . . . .                                                  | 189 |
| Количество воздуха и дыма . . . . .                                                        | 194 |

|                                             |     |
|---------------------------------------------|-----|
| Сравнительные характеристики . . . . .      | 196 |
| Коэффициент использования топлива . . . . . | 202 |

### Раздел третий

## МЕХАНИКА ГАЗОВ

|                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| Глава IX. Давления и напоры . . . . .                                 | 209 |
| Основныe понятия и законы . . . . .                                   | 209 |
| Потери давления . . . . .                                             | 213 |
| Потери на трение . . . . .                                            | 214 |
| Коэффициент трения при ламинарном режиме ( $Re \leq 2000$ ) . . . . . | 214 |
| Коэффициент трения при турбулентном режиме . . . . .                  | 215 |
| Потери на местное сопротивление . . . . .                             | 216 |
| 1. Изменение направления потока . . . . .                             | 218 |
| 2. Изменение скорости потока . . . . .                                | 222 |
| 3. Выход потока из канала . . . . .                                   | 228 |
| 4. Вход потока в канал . . . . .                                      | 230 |
| 5. Слияние и разделение потоков . . . . .                             | 235 |
| 6. Сыпучие материалы . . . . .                                        | 239 |
| 7. Течение газо-жидкостной смеси . . . . .                            | 242 |
| 8. Некоторые частные случаи . . . . .                                 | 243 |
| Глава X. Оборудование для создания давлений и разрежений . . . . .    | 245 |
| Оборудование для нагнетания газов . . . . .                           | 245 |
| Оборудование для создания тяги . . . . .                              | 245 |
| Глава XI. Струйное течение газов . . . . .                            | 254 |
| Истечение газов при низком давлении . . . . .                         | 254 |
| Истечение газов при высоком давлении . . . . .                        | 254 |
| Истечение газов через сопло Лаваля . . . . .                          | 257 |
| Аэродинамика струи . . . . .                                          | 259 |
| Струйные аппараты . . . . .                                           | 261 |
| Факел пламени . . . . .                                               | 264 |
| Факел предварительно перемешанной газовой смеси . . . . .             | 269 |
| Опытные данные . . . . .                                              | 275 |

### Раздел четвертый

## ТЕПЛОПЕРЕДАЧА И НАГРЕВ ИЗДЕЛИЙ

|                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Глава XII. Теплопередача . . . . .                                           | 278 |
| Теплопередача посредством теплопроводности при стационарном режиме . . . . . | 278 |
| Теплопередача через плоскую многослойную стенку . . . . .                    | 278 |
| Теплопередача через цилиндрическую стенку . . . . .                          | 278 |
| Теплопередача через оребренную поверхность . . . . .                         | 279 |
| Теплоотдача конвекцией . . . . .                                             | 279 |
| Теплоотдача при свободной конвекции . . . . .                                | 279 |
| Теплоотдача при вынужденном движении жидкости . . . . .                      | 281 |
| Конвективный теплообмен при изменении агрегатного состояния . . . . .        | 284 |
| Передача тепла излучением . . . . .                                          | 285 |
| Основные понятия и законы . . . . .                                          | 285 |
| Свойства лучистых потоков . . . . .                                          | 295 |

|                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Теплообмен посредством излучения между двумя абсолютно черными телами, произвольно расположенными в пространстве    | 296 |
| Теплообмен излучением между серыми телами                                                                           | 305 |
| Теплообмен при наличии экранов                                                                                      | 305 |
| Излучение через отверстия                                                                                           | 306 |
| Излучение газов и паров                                                                                             | 306 |
| Теплообмен между серыми телами в замкнутом пространстве, заполненном лучепоглощающей средой                         | 311 |
| Коэффициент теплоотдачи излучением                                                                                  | 313 |
| Коэффициент теплопередачи                                                                                           | 314 |
| Глава XIII. Нагрев и охлаждение тел                                                                                 | 315 |
| Методы расчетов нагрева и охлаждения изделий                                                                        | 315 |
| Нагрев тонких изделий                                                                                               | 318 |
| Нагрев тонких изделий в печи с постоянной температурой                                                              | 318 |
| Нагрев тонких изделий в печи с переменной температурой                                                              | 319 |
| Нагрев массивных изделий                                                                                            | 319 |
| Методы расчетов нагрева, основанные на решении основного дифференциального уравнения теплопроводности               | 319 |
| Поверхностные условия I рода                                                                                        | 320 |
| Поверхностные условия II рода                                                                                       | 326 |
| Поверхностные условия III рода                                                                                      | 328 |
| Метод тепловой диаграммы                                                                                            | 340 |
| Расчет по методу «тонких» изделий с поправкой на массивность                                                        | 340 |
| Метод регулярного режима при условии нагрева $t_n = \text{const}$                                                   | 341 |
| Нагрев горячих слитков                                                                                              | 343 |
| Нагрев неподвижного слоя материалов                                                                                 | 345 |
| Нагрев заготовок на монолитном поду методических печей                                                              | 349 |
| Технология нагрева стали                                                                                            | 350 |
| Температурные напряжения при нагреве                                                                                | 353 |
| Окисление стали при нагреве                                                                                         | 355 |
| Список литературы                                                                                                   | 359 |
| Приложение 1. Перевод некоторых величин из прежних систем в международную систему единиц СИ                         | 364 |
| Приложение 2. Переводные множители для перехода от некоторых английских и американских единиц к единицам системы СИ | 366 |

## ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

Со времени выхода в свет I издания книги «Промышленные печи» прошло 10 лет. За это время в учебный процесс высших учебных заведений страны прочно вошла международная система единиц СИ. В связи с этим материал справочника, относящийся к величинам удельных теплоемкостей, коэффициентов теплопроводности, давлений, коэффициентов вязкости и пр., пересчитан и перечерчен. Часть диаграмм имеет справа шкалу в ранее применявшейся системе единиц.

Вновь написаны подразделы по расчету факела пламени, окислению сталей при нагреве, нагреву слоя материалов и др.; введены новые и дополнительные данные в некоторые таблицы и графики.

Из справочника удалены материалы, относящиеся к данным о твердом топливе, о контрольно-измерительной и регулирующей аппаратуре, о нормах технологического проектирования, что обусловлено ограничением объема книги.

Автор благодарен принимавшим участие в рецензировании книги сотрудникам кафедр теории и автоматизации металлургических печей: Московского института стали и сплавов (заведующий кафедрой профессор М. А. Глишков), Днепропетровского металлургического института (заведующий кафедрой проф. Н. Ю. Тайц ) и Уральского политехнического института (заведующий кафедрой профессор Китаев Б. И.), а также рецензенту 2-го издания доценту УПИ А. С. Телегину.

Автор не может не вспомнить добрым словом рецензента 1-го издания книги профессора ДМетИ И. Д. Семикина

## РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

### ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ

#### Основные понятия и обозначения

$a = \lambda / \rho c$  — коэффициент температуропроводности, характеризующий скорость выравнивания температуры в неравномерно нагретом теле,  $\text{м}^2/\text{с}$ ,  $\text{Л}^2\text{T}^{-1}$ ;

$C = cG$  — теплоемкость, представляющая собой отношение количества тепла, требуемого для повышения температуры массы  $G$  кг вещества на  $1^\circ\text{C}$ , к расходу тепла на повышение температуры такого же массового количества воды с  $14,5$  до  $15,5^\circ\text{C}$ ;  $\text{Дж}/^\circ\text{C}$ ;  $\text{Л}^2\text{MT}^{-2}\theta^{-1}$ ;

$c$  — удельная теплоемкость — теплоемкость  $1$  кг вещества, измеренная при постоянном давлении ( $c_p$ ) или постоянном объеме ( $c_v$ ), при его нагреве на  $1^\circ$ ,  $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ ;  $\text{Л}^2\text{T}^{-2}\theta^{-1}$ . Отношение  $c_p/c_v = k$ , где  $k$  — показатель адиабаты;

$C_{\text{н}} = dQ/dt$  — истинная теплоемкость, характеризующая тепловую энергию данной системы при вполне определенной температуре;

$c_{\text{ср}} = \frac{Q}{t_2 - t_1} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} c \cdot dt$  — средняя теплоемкость, представляющая собой изменение количества тепла в некотором интервале температур ( $t_2 - t_1$ );

$c_{\text{м}}$  — молярная теплоемкость. Для твердых веществ  $c_{\text{м}} = cM$ , где  $M$  — молекулярная масса вещества; для газов  $c_{\text{м}} = c \cdot 22,4$ , где  $22,4$  — объем моля при нормальных условиях ( $0^\circ\text{C}$ ,  $101325 \text{ Н/м}^2$ ),  $\text{кДж}/(\text{моль}\cdot^\circ\text{C})$ ;

$E$  — модуль Юнга продольной упругости,  $\text{Н/м}^2$ ;  $\text{Л}^{-1}\text{MT}^{-2}$ ;

$HV$  — твердость по Бринеллю,  $\text{Н/м}^2$ ;  $\text{Л}^{-1}\text{MT}^{-2}$ ;

$i$  — удельная энтальпия (теплосодержание) — количество тепла  $Q$ , потребное для нагревания при постоянном давлении массы вещества в  $1$  кг или его объема в  $1 \text{ м}^3$  от  $0$  до  $t^\circ\text{C}$ ;

$$i = c_{\text{ср}} t; \quad i = \int_0^t c \cdot dt.$$

Приращение энтальпии

$$\Delta i = i_2 - i_1 = c_0' t_2 - c_0' t_1 = \int_{t_1}^{t_2} c \cdot dt. \quad \text{кДж/кг, кДж/м}^3;$$

$\text{Л}^2\text{T}^{-2}, \text{Л}^{-1}\text{MT}^{-2}$ ;

$k$  — удельная электропроводность;  $k = \frac{1}{\rho} \quad 1/(\text{Ом}\cdot\text{м})$ ;

$\text{Л}^{-3}\text{M}^{-1}\text{T}^3 \text{ I}^2$ ;

$k$  — показатель адиабаты,  $k = c_p/c_v$ ;

$M$  — молекулярная масса вещества,  $\text{кг/моль}$ ;

$P$  — давление,  $\text{Н/м}^2$ ;  $\text{Л}^{-1}\text{MT}^{-2}$ ;

$Pr = v/a$  — критерий Прандтля, характеризует механизм и способность распространения тепла в жидкой и газообразной средах и является мерой подобия температурных и скоростных полей в потоке. При  $Pr=1$  и градиенте давления  $\text{grad } P=0$  поля температур и скоростей в потоках подобны;

$Q_{\text{пл}}$  — теплота плавления, кДж/кг;  $L^2 T^{-2}$ ;

$r_{\text{H}_2\text{O}}$  — влажность дымовых газов, парциальное давление водяных паров в продуктах сгорания;

$s$  — удельная энтропия, кДж/(кг·°C);  $L^2 T^{-2} \theta^{-1}$ ;

$T, t$  — температура вещества — мера, определяющая степень нагретости, которая представляет собой среднюю кинетическую энергию атомов или молекул данного вещества. Измеряется в градусах Кельвина (К) или в градусах Цельсия (°C);  $t$  — температура по шкале Цельсия (°C);  $T$  — температура по термодинамической шкале температур Кельвина,  $T = t + 273,16$ , К;  $\theta$ ;

$t_{\text{кип}}$  — температура кипения;

$t_{\text{пл}}$  — температура плавления;

$V$  — объем вещества, м<sup>3</sup>;  $L^3$ ;

$v$  — удельный объем, т. е. объем, приходящийся на единицу массы вещества, м<sup>3</sup>/кг;  $L^3 M^{-1}$ ;

$W$  — влажность массовая, %;

$x$  — степень сухости пара,  $x = 0 \div 1$ ;

$\alpha$  — коэффициент повышения давления среды при постоянном объеме, определяется по формуле

$$\alpha = \frac{P_t - P_0}{P_0 t}, \quad 1/^\circ\text{C}; \quad \theta^{-1};$$

$\alpha_{\text{л}}$  — коэффициент линейного расширения, %;

$\beta$  — коэффициент линейного расширения, характеризует изменение линейных размеров твердых тел при изменении их температуры,  $1/^\circ\text{C}$  или  $\text{м}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ . Значения  $\alpha$  и  $\beta$  зависят от начального давления газа. Если газ точно подчиняется закону Бойля—Мариотта, то  $\alpha = \beta$ ;

$\beta$  — коэффициент объемного расширения вещества, отражающий способность вещества изменять объем при изменении температуры на 1 град; при постоянном давлении определяется по формуле

$$\beta = \frac{v_t - v_0}{v_0 t} \quad 1/^\circ\text{C} \quad \text{или} \quad \text{м}^3/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}); \quad \theta^{-1};$$

$\delta$  — относительное удлинение, %;

$\varepsilon$  — деформация под нагрузкой, %;

$\lambda$  — коэффициент теплопроводности, характеризующий способность тел к осуществлению кондуктивной теплопередачи. Численно равен количеству тепла, передаваемому за 1 ч через 1 м<sup>2</sup> изотермической поверхности (удельному тепловому потоку  $q$ ) при разности температур в 1 град между ограничивающими поверхностями в теле толщиной 1 м (градиент температуры  $\text{grad } t = 1$ ). При прямолинейном изменении  $\lambda$  в зависимости от температуры определяют по формуле  $\lambda_t = \lambda_0 \pm b t$ , где  $\lambda_0$  и  $\lambda_t$  — соответственно коэффициенты теплопроводности при 0°C и температуре  $t$ ;  $b$  — коэффициент, показывающий изменение  $\lambda$  при изменении  $t$  на 1 град, Вт/(м·°C);  $LMT^{-2} \theta^{-1}$ ;

- $\nu = \eta / \rho$  — коэффициент кинематической вязкости, представляет собой отношение вязкости к плотности (объемной массе) данной среды,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $L^2 T^{-1}$ ;
- $\psi$  — относительное сужение, %;
- $\rho$  — плотность (объемная масса), масса вещества (кг), занимающая объем в  $1 \text{ м}^3$  ( $\text{кг}/\text{м}^3$ );  $L^{-3} M$ . Обратная величина плотности  $\nu = 1/\rho$  — удельный объем ( $\text{м}^3/\text{кг}$ ), характеризующий объем единицы количества (массы) вещества;  $L^3 M^{-1}$ ;
- $\rho_{\text{э}}, \rho$  — удельное-электрическое сопротивление,  $\text{Ом} \cdot \text{м}$ ;  $L^3 M T^{-3} I^{-2}$ ;
- $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения,  $\text{Дж}/\text{м}^2$ ;  $M T^{-2}$ ;
- $\sigma_{\text{в}}, \sigma_{\text{пч}}$  — предел прочности при растяжении,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ;  $L^{-1} M T^{-2}$ ;
- $\sigma_{\text{пл}}$  — предел пропорциональности,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ;  $L^{-1} M T^{-2}$ ;
- $\sigma_{\text{т}}$  — предел текучести,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ;  $L^{-1} M T^{-2}$ ;
- $\eta$  — коэффициент вязкости, характеризующий внутреннее трение жидкостей или газов, их способность оказывать сопротивление относительному перемещению своих слоев; представляет собой изменение количества движения объема жидкости, приходящееся на единицу поверхности соприкосновения слоев,  $\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ ;  $L^{-1} M T^{-1}$ .

#### Индексы:

- кип — параметры вещества при температуре кипения;
- кр — параметры вещества в критическом состоянии;
- 0 — начальные значения параметров; значения параметров при нормальных условиях ( $0^\circ\text{C}$ ;  $101325 \text{ Н}/\text{м}^2$ );
- пл — параметры вещества при температуре плавления;
- $p$  — значения параметра при постоянном давлении;
- ср или  $m$  — усредненные параметры вещества;
- $v$  — значения параметра при постоянном объеме.

Примечание. В настоящее время в соответствии с системой СИ для измерения давлений введена новая единица — паскаль (Па):

$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н}/\text{м}^2$ ;

$1 \text{ мм вод. ст.} = 9,80665 \text{ Н}/\text{м}^2 = 0,980665 \text{ Па}$ ;

$1 \text{ мм вод. ст.} \approx 10 \text{ Па}$  или  $1 \text{ мм вод. ст.} = 1 \text{ даПа}$  с ошибкой менее 2%.

# ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОВ

Т а б л и ц а I-1

Основные физические характеристики газов

| Название вещества<br>и его химическая формула  | Молекулярная<br>масса $M$ | Плотность<br>при нормальных<br>условиях $\rho$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> | Относительная<br>плотность<br>(к воздуху) |
|------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Азот ( $N_2$ ) . . . . .                       | 28,016                    | 1,2505                                                                | 0,9673                                    |
| Аммиак ( $NH_3$ ) . . . . .                    | 17,031                    | 0,7714                                                                | 0,6967                                    |
| Аргон (Ar) . . . . .                           | 39,944                    | 1,7839                                                                | 1,3799                                    |
| Ацетилен ( $C_2H_2$ ) . . . . .                | 26,04                     | 1,1709                                                                | 0,9057                                    |
| Ацетон ( $C_3H_6O$ ) . . . . .                 | 58,08                     | (2,595)                                                               | 2,005                                     |
| Н-бутан ( $C_4H_{10}$ ) . . . . .              | 58,12                     | 2,703                                                                 | 2,091                                     |
| Изо-бутан ( $C_4H_{10}$ ) . . . . .            | 58,12                     | 2,668                                                                 | 2,064                                     |
| Н-бутиловый спирт ( $C_4H_{10}O$ ) . . . . .   | 74,12                     | 3,244                                                                 | 2,610                                     |
| Вода ( $H_2O$ ) . . . . .                      | 18,016                    | 0,768                                                                 | 0,5941                                    |
| Водород ( $H_2$ ) . . . . .                    | 2,0156                    | 0,08987                                                               | 0,06952                                   |
| Воздух (сухой) . . . . .                       | 28,96                     | 1,2928                                                                | 1,000                                     |
| Н-гексан ( $C_6H_{14}$ ) . . . . .             | 86,17                     | (3,845)                                                               | 2,970                                     |
| Гелий (He) . . . . .                           | 4,003                     | 0,1785                                                                | 0,1381                                    |
| Н-гептан ( $C_7H_{16}$ ) . . . . .             | 100,19                    | 4,459                                                                 | 3,450                                     |
| Двуокись углерода ( $CO_2$ ) . . . . .         | 44,01                     | 1,9768                                                                | 1,5291                                    |
| Н-декан ( $C_{10}H_{22}$ ) . . . . .           | 142,3                     | (6,35)                                                                | 4,91                                      |
| Дифенил ( $C_{12}H_{10}$ ) . . . . .           | 154,08                    | (6,89)                                                                | 5,33                                      |
| Дифениловый эфир ( $C_{12}H_{10}O$ ) . . . . . | 168,8                     | (7,54)                                                                | 5,83                                      |
| Дихлорметан ( $CH_2Cl_2$ ) . . . . .           | 84,94                     | (3,79)                                                                | 2,93                                      |
| Диэтиловый эфир ( $C_4H_{10}O$ ) . . . . .     | 74,12                     | (3,30)                                                                | 2,55                                      |
| Закись азота ( $N_2O$ ) . . . . .              | 44,016                    | 1,9780                                                                | 1,53                                      |
| Иодистый водород (HI) . . . . .                | 127,93                    | 5,789                                                                 | 4,478                                     |
| Кислород ( $O_2$ ) . . . . .                   | 32,000                    | 1,42895                                                               | 1,1033                                    |
| Криптон (Kr) . . . . .                         | 83,7                      | 3,74                                                                  | 2,89                                      |
| Ксенон (Xe) . . . . .                          | 131,3                     | 5,89                                                                  | 4,51                                      |
| Метан ( $CH_4$ ) . . . . .                     | 16,04                     | 0,7168                                                                | 0,5545                                    |
| Метиламин ( $CH_5N$ ) . . . . .                | 31,06                     | 1,388                                                                 | 1,0737                                    |

| Объем киломоля<br>$\text{м}^3/\text{кмоль}$ | Температура, °C              |                             |                                | Критическое<br>давление<br>$p_{\text{кр}}, \text{МН/м}^2$ | Критическая<br>плотность<br>$\rho_{\text{кр}}, \text{кг/м}^3$ |
|---------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
|                                             | плавления<br>$t_{\text{пл}}$ | кипения<br>$t_{\text{кип}}$ | критическая<br>$t_{\text{кр}}$ |                                                           |                                                               |
| 22,4                                        | -210,02                      | -195,81                     | -147,0                         | 3,391                                                     | 311                                                           |
| 22,08                                       | -77,7                        | -33,4                       | 132,3                          | 11,27                                                     | 235                                                           |
| 22,39                                       | -189,3                       | -185,9                      | -122                           | 4,861                                                     | 531                                                           |
| 22,22                                       | -81* <sup>1</sup>            | -83,6* <sup>2</sup>         | 35,7                           | 6,243                                                     | 231                                                           |
| (22,41)                                     | -94,3                        | 56,1                        | 235,5                          | 4,714                                                     | 273                                                           |
| 21,50                                       | -135                         | 0,5                         | 152,0                          | 3,793                                                     | 228                                                           |
| 21,78                                       | -145                         | -10,2                       | 134,9                          | 3,646                                                     | 221                                                           |
| 22,84                                       | -89,8                        | 117,7                       | 288                            | 4,959                                                     | —                                                             |
| 23,45                                       | 0,0                          | 100,0                       | 374,15                         | 22,114                                                    | 307                                                           |
| 22,43                                       | -259,2                       | -252,78                     | -239,9                         | 1,294                                                     | 31                                                            |
| 22,4                                        | -213                         | -193                        | -140,7                         | 3,763                                                     | 310                                                           |
| (22,41)                                     | -95,3                        | 68,73                       | 234,7                          | 3,028                                                     | 234                                                           |
| 22,42                                       | —                            | -268,93                     | -267,9                         | 0,228                                                     | 69,3                                                          |
| 22,47                                       | -90,6                        | 98,4                        | 267,0                          | 2,734                                                     | 235                                                           |
| 22,26                                       | -56                          | -78,48                      | 31,04                          | 7,777                                                     | 468                                                           |
| (22,41)                                     | -31                          | 173                         | 346                            | 2,078                                                     | 230                                                           |
| (22,41)                                     | -70,5                        | 255,3                       | 496                            | 3,116                                                     | —                                                             |
| (22,41)                                     | 80                           | 287                         | —                              | —                                                         | —                                                             |
| (22,41)                                     | -96,5                        | -40                         | 245                            | 4,449                                                     | —                                                             |
| (22,41)                                     | -129                         | 34,6                        | 194                            | 3,606                                                     | 264                                                           |
| 22,05                                       | -90,8                        | -88,7                       | 36,5                           | 7,262                                                     | 457                                                           |
| 22,1                                        | -51                          | -36                         | 150                            | 8,203                                                     | —                                                             |
| 22,39                                       | -218,83                      | -182,97                     | -118,4                         | 5,067                                                     | 410                                                           |
| 22,38                                       | -157,2                       | -153,2                      | -63,8                          | 5,498                                                     | 908                                                           |
| 22,29                                       | -111,9                       | -108,8                      | 16,6                           | 5,870                                                     | 1110                                                          |
| 22,36                                       | -182,5                       | -161,5                      | -82,1                          | 4,635                                                     | 162                                                           |
| 22,37                                       | -92,5                        | -6,5                        | 156,9                          | 7,448                                                     | —                                                             |

| Название вещества и его химическая формула                   | Молекулярная масса $M$ | Плотность при нормальных условиях $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | Относительная плотность (к воздуху) |
|--------------------------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Метиловый спирт ( $\text{CH}_4\text{O}$ ) . . . . .          | 32,04                  | 1,426                                                        | 1,103                               |
| Неон (Ne) . . . . .                                          | 20,183                 | 0,8999                                                       | 0,6961                              |
| Нитрозилхлорид ( $\text{NOCl}$ ) . . . . .                   | 65,465                 | 2,9919                                                       | 2,314                               |
| Озон ( $\text{O}_3$ ) . . . . .                              | 48,000                 | 2,22                                                         | 1,71                                |
| Оксись азота ( $\text{NO}$ ) . . . . .                       | 30,008                 | 1,3402                                                       | 1,0367                              |
| Оксись углерода ( $\text{CO}$ ) . . . . .                    | 28,01                  | 1,2500                                                       | 0,9669                              |
| Н-октан ( $\text{C}_8\text{H}_{18}$ ) . . . . .              | 114,22                 | 5,030                                                        | 3,890                               |
| Н-пентан ( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ) . . . . .             | 72,14                  | 3,457                                                        | 2,674                               |
| Изо-пентан ( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ) . . . . .           | 72,14                  | (3,22)                                                       | 2,49                                |
| Пропан ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) . . . . .                  | 44,09                  | 2,0037                                                       | 1,550                               |
| Пропилен ( $\text{C}_3\text{H}_6$ ) . . . . .                | 42,08                  | 1,915                                                        | 1,481                               |
| Селеновая кислота ( $\text{H}_2\text{Se}$ ) . . . . .        | 80,968                 | 3,6643                                                       | 2,9002                              |
| Сернистый газ ( $\text{SO}_2$ ) . . . . .                    | 64,06                  | 2,9263                                                       | 2,2635                              |
| Сернистый ангидрид ( $\text{SO}_3$ ) . . . . .               | 80,06                  | (3,575)                                                      | 2,765                               |
| Сероводород ( $\text{H}_2\text{S}$ ) . . . . .               | 34,08                  | 1,5392                                                       | 1,1906                              |
| Фосфористый водород ( $\text{PH}_3$ ) . . . . .              | 34,04                  | 1,530                                                        | 1,183                               |
| Фреон-11 ( $\text{CF}_3\text{Cl}$ ) . . . . .                | 137,4                  | (6,13)                                                       | 4,74                                |
| Фреон-12 ( $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ ) . . . . .              | 120,92                 | 5,510                                                        | 4,262                               |
| Фреон-13 ( $\text{CFCl}_3$ ) . . . . .                       | 114,47                 | (5,11)                                                       | 3,95                                |
| Фтор ( $\text{F}_2$ ) . . . . .                              | 38,000                 | 1,695                                                        | 1,31                                |
| Фтористый кремний ( $\text{SiF}_4$ ) . . . . .               | 104,06                 | 4,6905                                                       | 3,7133                              |
| Фтористый метил ( $\text{CH}_3\text{F}$ ) . . . . .          | 34,03                  | 1,545                                                        | 1,195                               |
| Хлор ( $\text{Cl}_2$ ) . . . . .                             | 70,914                 | 3,22                                                         | 2,49                                |
| Хлористый водород ( $\text{HCl}$ ) . . . . .                 | 36,465                 | 1,6391                                                       | 1,2679                              |
| Хлористый метил ( $\text{CH}_3\text{Cl}$ ) . . . . .         | 50,49                  | 2,307                                                        | 1,784                               |
| Хлороформ ( $\text{CHCl}_3$ ) . . . . .                      | 119,39                 | 5,283                                                        | 4,087                               |
| Циан ( $\text{C}_2\text{N}_2$ ) . . . . .                    | 52,04                  | (2,765)                                                      | 2,14                                |
| Цианистая кислота ( $\text{HCN}$ ) . . . . .                 | 27,026                 | (1,205)                                                      | 0,933                               |
| Этан ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) . . . . .                    | 30,07                  | 1,356                                                        | 1,049                               |
| Этиламин ( $\text{C}_2\text{H}_7\text{N}$ ) . . . . .        | 45,08                  | 2,0141                                                       | 0,706                               |
| Этилен ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ) . . . . .                  | 28,05                  | 1,2605                                                       | 0,9750                              |
| Этиловый спирт ( $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ ) . . . . .  | 46,07                  | 2,043                                                        | 1,580                               |
| Хлористый этил ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$ ) . . . . . | 64,52                  | (2,88)                                                       | 2,225                               |

Примечания: 1. У некоторых веществ температура кипения при атмосферном давлении условными, но ими пользуются для расчетов  $\rho$  при различных температурах и давлениях.

\*1 Тройная точка. \*2 Точка сублимации.

| Объем киломоля<br>$m^3/kмоль$ | Температура, °C       |                      |                         | Критическое<br>давление<br>$p_{кр}$ , МН/м <sup>2</sup> | Критическая<br>плотность<br>$\rho_{кр}$ , кг/м <sup>3</sup> |
|-------------------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
|                               | плавления<br>$t_{пл}$ | кипения<br>$t_{кип}$ | критическая<br>$t_{кр}$ |                                                         |                                                             |
| 22,47                         | -98                   | 64,51                | 240                     | 7,948                                                   | 272                                                         |
| 22,43                         | -248,6                | -246,1               | -228,7                  | 2,724                                                   | 484                                                         |
| 21,88                         | -61,5                 | -5,5                 | 165                     | 9,369                                                   | —                                                           |
| 21,6                          | -252                  | -112                 | -5                      | 6,782                                                   | 537                                                         |
| 22,39                         | -163,5                | -152                 | -93                     | 6,778                                                   | 52                                                          |
| 22,40                         | -205                  | -191,5               | -140                    | 3,489                                                   | 301                                                         |
| 22,71                         | -57                   | -125,7               | 296,7                   | 2,489                                                   | 233                                                         |
| 20,87                         | -135,5                | 36,1                 | 196,6                   | 3,371                                                   | 232                                                         |
| (22,41)                       | -160,0                | 28,0                 | 187,8                   | 3,332                                                   | 234                                                         |
| 22,00                         | -189,9                | -42,6                | 96,8                    | 4,253                                                   | 220                                                         |
| 21,96                         | -185,2                | -47                  | 92,0                    | 4,616                                                   | 233                                                         |
| 21,82                         | —                     | —                    | —                       | —                                                       | —                                                           |
| 21,89                         | -75,3                 | -10,0                | 157,5                   | 7,879                                                   | 524                                                         |
| (22,41)                       | -16,8                 | 46                   | 218,2                   | 8,487                                                   | 633                                                         |
| 22,14                         | -85,6                 | -60,4                | 100,4                   | 8,996                                                   | 349                                                         |
| 22,25                         | -133,5                | -87,5                | 51,3                    | 6,527                                                   | —                                                           |
| (22,41)                       | -111                  | 23,65                | 198,0                   | 4,371                                                   | 554                                                         |
| 21,95                         | -155                  | -29,8                | 111,5                   | 3,920                                                   | 555                                                         |
| (22,41)                       | -181                  | -81,50               | 28,75                   | 3,861                                                   | 581                                                         |
| 22,42                         | -120                  | -188                 | -101                    | 5,566                                                   | —                                                           |
| 22,18                         | -90                   | -75                  | -14,1                   | 3,714                                                   | —                                                           |
| 22,03                         | —                     | -78                  | 44,6                    | 5,870                                                   | 300                                                         |
| 22,02                         | -100,5                | -33,95               | 144                     | 7,703                                                   | 573                                                         |
| 22,25                         | -11,2                 | -85                  | 51,4                    | 8,252                                                   | 420                                                         |
| 21,88                         | -91,5                 | -24,0                | 143,1                   | 6,674                                                   | 353                                                         |
| 22,60                         | -68,5                 | 61,30                | 263,4                   | 5,468                                                   | 500                                                         |
| (22,41)                       | -34,4                 | -21                  | 128,3                   | 6,076                                                   | —                                                           |
| (22,41)                       | -14,2                 | -20,8                | 183,5                   | 5,370                                                   | 195                                                         |
| 22,16                         | -183,6                | -88,6                | 132,3                   | 4,880                                                   | 203                                                         |
| 22,37                         | -81                   | 16,5                 | 183                     | 5,615                                                   | 248                                                         |
| 22,24                         | -169,4                | -103,5               | 9,2                     | 5,057                                                   | 227                                                         |
| 22,55                         | -114,5                | 78,3                 | 243,1                   | 6,380                                                   | 276                                                         |
| (22,41)                       | -138,7                | 12,2                 | 187,2                   | 5,263                                                   | 330                                                         |

выше 0°C. Для паров этих веществ значения плотности при нормальных условиях  $\rho_0$  являются  
2. В скобках приведены плотности, подсчитанные по формуле для идеальных газов  $\rho = M/22,41$ .

Таблица 1-2

## Состав атмосферного воздуха (на высоте уровня моря)

| Название газа и его химическая формула | Содержание     |                 | Название газа и его химическая формула | Содержание         |                 |
|----------------------------------------|----------------|-----------------|----------------------------------------|--------------------|-----------------|
|                                        | %<br>(объемн.) | %<br>(по массе) |                                        | %<br>(объемн.)     | %<br>(по массе) |
| Азот ( $N_2$ ) . . . . .               | 78,09          | 75,5            | Криптон (Kr) . . . . .                 | 0,000108           | 0,0003          |
| Кислород ( $O_2$ ) . . . . .           | 20,95          | 23,10           | Ксенон (Xe) . . . . .                  | 0,000008           | 0,0004          |
| Аргон (Ar) . . . . .                   | 0,9325         | 1,286           | Радон (Rn) . . . . .                   | $6 \cdot 10^{-18}$ | —               |
| Неон (Ne) . . . . .                    | 0,0018         | 0,0012          | Двуокись углерода ( $CO_2$ ) . . . . . | 0,030              | 0,046           |
| Гелий (He) . . . . .                   | 0,0005         | 0,00007         | Водород ( $H_2$ ) . . . . .            | 0,00005            | —               |

Примечание. В составе не учтено содержание водяного пара, количество которого колеблется в атмосфере между 0,02 и 2% по массе.

Таблица 1-3

## Теплофизические свойства газов в зависимости от температуры (одноатомные газы)

| $t, ^\circ C$ | $\lambda \cdot 10^3$ ,<br>Вт/(м·°C) | $\eta \cdot 10^4$ ,<br>Н·с/м <sup>2</sup> | $Pr$ | $\nu \cdot 10^6$ ,<br>м <sup>2</sup> /с | $\frac{c_p}{c_v}$ ,<br>кДж/(кг·°C) | $\frac{c_p}{c_v} = k$ | $a \cdot 10^3$ ,<br>м <sup>2</sup> /с | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> |
|---------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|------|-----------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|----------------------------|
|---------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|------|-----------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|----------------------------|

## Аргон (Ar)

|     |      |      |       |      |       |      |      |       |
|-----|------|------|-------|------|-------|------|------|-------|
| 0   | 16,5 | 21,1 | 0,663 | 11,8 | 0,519 | 1,67 | 6,41 | 784   |
| 100 | 21,2 | 26,9 | 0,661 | 20,6 | 0,519 | 1,67 | 11,2 | 1,305 |
| 200 | 25,6 | 32,2 | 0,653 | 31,2 | 0,519 | 1,67 | 17,2 | 1,030 |
| 300 | 29,9 | 36,9 | 0,640 | 43,4 | 0,519 | 1,67 | 24,4 | 0,850 |
| 400 | 33,9 | 41,1 | 0,628 | 56,7 | 0,519 | 1,67 | 32,6 | 0,724 |
| 500 | 37,9 | 45,2 | 0,619 | 72,0 | 0,519 | 1,67 | 42,0 | 0,627 |
| 600 | 39,4 | 48,5 | 0,604 | 87,0 | 0,519 | 1,67 | 51,9 | 0,558 |

## Гелий (He)

|     |     |      |       |     |       |      |      |        |
|-----|-----|------|-------|-----|-------|------|------|--------|
| 0   | 143 | 18,7 | 0,684 | 105 | 5,204 | 1,67 | 55,2 | 0,1785 |
| 100 | 179 | 22,9 | 0,667 | 176 | 5,204 | 1,67 | 94,8 | 0,1305 |
| 200 | 213 | 27,0 | 0,660 | 270 | 5,204 | 1,67 | 143  | 0,1030 |
| 300 | 244 | 30,8 | 0,656 | 362 | 5,204 | 1,67 | 199  | 0,0850 |
| 400 | 276 | 34,3 | 0,648 | 474 | 5,204 | 1,67 | 263  | 0,0724 |
| 500 | 305 | 37,6 | 0,642 | 611 | 5,204 | 1,67 | 336  | 0,0627 |
| 600 | 333 | 40,3 | 0,631 | 723 | 5,204 | 1,67 |      | 0,0558 |

## Неон (Ne)

|     |      |      |       |      |       |      |      |        |
|-----|------|------|-------|------|-------|------|------|--------|
| 0   | 46,4 | 29,7 | 0,660 | 33,0 | 1,030 | 1,67 | 18,0 | 0,9000 |
| 100 | 57,8 | 36,4 | 0,648 | 55,3 | 1,030 | 1,67 | 30,6 | 0,659  |
| 200 | 68,6 | 42,5 | 0,637 | 81,8 | 1,030 | 1,67 | 46,1 | 0,519  |
| 300 | 78,5 | 48,2 | 0,633 | 112  | 1,030 | 1,67 | 64,0 | 0,429  |
| 400 | 88,0 | 53,4 | 0,625 | 146  | 1,030 | 1,67 | 84,3 | 0,365  |
| 500 | 97,2 | 58,4 | 0,619 | 185  | 1,030 | 1,67 | 107  | 0,318  |
| 600 | 106  | 63,0 | 0,612 | 224  | 1,030 | 1,67 | 132  | 0,281  |

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\lambda \cdot 10^3$ ,<br>Вт/(м·°C) | $\eta \cdot 10^6$ ,<br>Н·с/м² | $Pr$ | $\nu \cdot 10^8$ ,<br>м²/с | $c_p$ ,<br>кДж/(кг·°C) | $\frac{c_p}{c_v} = k$ | $\alpha \cdot 10^3$ ,<br>м²/ч | $\rho$ ,<br>кг/м³ |
|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------|------|----------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------|
|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------|------|----------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------|

## Криптон (Kr)

|     |      |      |       |      |       |      |      |       |
|-----|------|------|-------|------|-------|------|------|-------|
| 0   | 8,88 | 23,4 | 0,656 | 6,28 | 0,249 | 1,67 | 3,44 | 3,74  |
| 100 | 11,6 | 30,6 | 0,656 | 11,2 | 0,249 | 1,67 | 6,13 | 7,74  |
| 200 | 14,3 | 37,3 | 0,648 | 17,2 | 0,249 | 1,67 | 9,59 | 2,16  |
| 300 | 16,7 | 43,2 | 0,637 | 24,3 | 0,249 | 1,67 | 13,7 | 1,73  |
| 400 | 19,3 | 48,5 | 0,625 | 32,0 | 0,249 | 1,67 | 18,4 | 1,516 |
| 500 | 21,7 | 53,4 | 0,611 | 40,5 | 0,249 | 1,67 | 23,7 | 1,32  |
| 600 | 24,1 | 59,2 | 0,612 | 50,6 | 0,249 | 1,67 | 29,8 | 1,17  |

## Ксенон (Xe)

|     |      |      |       |      |       |      |      |      |
|-----|------|------|-------|------|-------|------|------|------|
| 0   | 5,23 | 21,1 | 0,638 | 3,41 | 0,158 | 1,67 | 2,02 | 5,89 |
| 100 | 6,95 | 28,2 | 0,643 | 6,55 | 0,158 | 1,67 | 3,67 | 4,31 |
| 200 | 8,63 | 34,8 | 0,639 | 10,2 | 0,158 | 1,67 | 5,77 | 3,40 |
| 300 | 10,2 | 40,7 | 0,630 | 14,5 | 0,158 | 1,67 | 8,28 | 2,81 |
| 400 | 11,7 | 46,4 | 0,619 | 19,4 | 0,158 | 1,67 | 11,3 | 2,39 |
| 500 | 13,5 | 51,4 | 0,603 | 24,7 | 0,158 | 1,67 | 14,7 | 2,08 |
| 600 | 15,0 | 54,9 | 0,579 | 29,9 | 0,158 | 1,67 | 18,5 | 1,84 |

## Пары ртути (Hg)

|     |      |      |       |      |       |      |      |      |
|-----|------|------|-------|------|-------|------|------|------|
| 200 | 7,68 | 45,1 | 0,620 | —    | —     | —    | —    | —    |
| 300 | 9,36 | 55,3 | 0,618 | —    | —     | —    | —    | —    |
| 400 | 11,0 | 65,8 | 0,616 | 18,1 | 0,104 | 1,67 | 10,4 | 3,64 |
| 500 | 12,7 | 74,5 | 0,613 | 24,1 | 0,104 | 1,67 | 13,8 | 3,16 |
| 600 | 14,4 | 85,0 | 0,612 | 31,1 | 0,104 | 1,67 | 17,5 | 2,80 |

Таблица I-4

Теплофизические свойства газов в зависимости от температуры (двухатомные газы)

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\lambda \cdot 10^3$ ,<br>Вт/(м·°C) | $\eta \cdot 10^6$ ,<br>Н·с/м² | $Pr$ | $\nu \cdot 10^8$ ,<br>м²/с | $c_p$ ,<br>кДж/(кг·°C) | $\frac{c_p}{c_v} = k$ | $\alpha \cdot 10^3$ ,<br>м²/ч | $\rho$ , кг/м³ |
|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------|------|----------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------|
|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------|------|----------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------|

## Азот (N₂)

|      |      |      |       |      |       |       |      |       |
|------|------|------|-------|------|-------|-------|------|-------|
| 0    | 24,3 | 16,7 | 0,705 | 13,3 | 1,030 | 1,402 | 6,89 | 1,250 |
| 100  | 31,5 | 20,7 | 0,678 | 22,5 | 1,034 | 1,400 | 11,6 | 0,916 |
| 200  | 38,5 | 24,2 | 0,656 | 33,6 | 1,043 | 1,394 | 18,3 | 0,723 |
| 300  | 44,9 | 27,7 | 0,652 | 46,4 | 1,060 | 1,385 | 25,5 | 0,597 |
| 400  | 50,7 | 30,9 | 0,659 | 60,9 | 1,082 | 1,375 | 33,3 | 0,508 |
| 500  | 55,8 | 33,9 | 0,672 | 76,9 | 1,106 | 1,364 | 41,1 | 0,442 |
| 600  | 60,4 | 36,9 | 0,689 | 94,3 | 1,129 | 1,355 | 49,1 | 0,392 |
| 700  | 64,2 | 39,6 | 0,710 | 113  | 1,151 | 1,345 | 57,0 | 0,352 |
| 800  | 67,2 | 42,3 | 0,734 | 133  | 1,171 | 1,337 | 65,4 | 0,318 |
| 900  | 70,1 | 45,0 | 0,762 | 154  | 1,188 | 1,331 | 73,1 | 0,291 |
| 1000 | 72,3 | 47,5 | 0,795 | 177  | 1,203 | 1,323 | 80,2 | 0,268 |

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\lambda \cdot 10^3$ ,<br>Вт/(м·°C) | $\eta \cdot 10^6$ ,<br>Н·с/м² | $Pr$ | $\nu \cdot 10^6$ ,<br>м²/с | $\frac{c_p}{\rho}$ ,<br>кДж/(кг·°C) | $\frac{c_p}{c_v} = k$ | $\alpha \cdot 10^5$ ,<br>м³/ч | $\rho$ , кг/м³ |
|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------|------|----------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------|
|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------|------|----------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------|

Водород (H<sub>2</sub>)

|      |     |      |       |      |       |       |      |        |
|------|-----|------|-------|------|-------|-------|------|--------|
| 0    | 172 | 8,36 | 0,688 | 93,0 | 14,19 | 1,410 | 48,6 | 0,0899 |
| 100  | 220 | 10,3 | 0,677 | 157  | 14,45 | 1,398 | 83,4 | 0,0657 |
| 200  | 264 | 12,1 | 0,666 | 233  | 14,50 | 1,396 | 126  | 0,0519 |
| 300  | 307 | 13,8 | 0,655 | 323  | 14,53 | 1,395 | 178  | 0,0428 |
| 400  | 348 | 15,4 | 0,644 | 423  | 14,58 | 1,394 | 236  | 0,0364 |
| 500  | 387 | 16,9 | 0,640 | 534  | 14,66 | 1,390 | 300  | 0,0317 |
| 600  | 427 | 18,3 | 0,635 | 656  | 14,78 | 1,387 | 370  | 0,0281 |
| 700  | 463 | 19,7 | 0,637 | 785  | 14,93 | 1,381 | 443  | 0,0252 |
| 800  | 500 | 21,1 | 0,638 | 924  | 15,11 | 1,375 | 523  | 0,0228 |
| 900  | 536 | 22,4 | 0,640 | 1070 | 15,31 | 1,369 | 603  | 0,0209 |
| 1000 | 571 | 23,7 | 0,644 | 1230 | 15,52 | 1,361 | 688  | 0,0192 |

## Воздух

|      |      |      |       |      |       |       |      |       |
|------|------|------|-------|------|-------|-------|------|-------|
| 0    | 24,4 | 17,2 | 0,707 | 13,3 | 1,004 | 1,400 | 6,76 | 1,293 |
| 100  | 32,1 | 21,9 | 0,688 | 23,0 | 1,009 | 1,397 | 12,1 | 0,946 |
| 200  | 39,3 | 26,0 | 0,680 | 34,8 | 1,026 | 1,390 | 18,4 | 0,747 |
| 300  | 46,1 | 29,7 | 0,674 | 48,2 | 1,047 | 1,378 | 25,7 | 0,616 |
| 400  | 52,1 | 33,0 | 0,678 | 63,0 | 1,068 | 1,366 | 33,5 | 0,524 |
| 500  | 57,4 | 36,2 | 0,687 | 79,3 | 1,093 | 1,357 | 41,5 | 0,456 |
| 600  | 62,3 | 39,1 | 0,699 | 96,8 | 1,114 | 1,345 | 49,9 | 0,404 |
| 700  | 67,1 | 41,8 | 0,706 | 115  | 1,135 | 1,337 | 58,7 | 0,363 |
| 800  | 71,8 | 44,3 | 0,713 | 135  | 1,156 | 1,330 | 68,2 | 0,328 |
| 900  | 76,3 | 46,7 | 0,717 | 155  | 1,172 | 1,325 | 77,8 | 0,301 |
| 1000 | 80,7 | 49,0 | 0,719 | 178  | 1,185 | 1,320 | 88,8 | 0,276 |

Кислород (O<sub>2</sub>)

|      |      |      |       |      |        |       |      |       |
|------|------|------|-------|------|--------|-------|------|-------|
| 0    | 24,7 | 19,4 | 0,720 | 13,6 | 0,9148 | 1,397 | 6,80 | 1,429 |
| 100  | 32,9 | 24,1 | 0,686 | 23,1 | 0,9336 | 1,385 | 12,1 | 1,05  |
| 200  | 40,7 | 28,5 | 0,674 | 34,6 | 0,9630 | 1,370 | 15,6 | 0,826 |
| 300  | 48,0 | 32,5 | 0,673 | 47,8 | 0,9948 | 1,353 | 25,4 | 0,682 |
| 400  | 55,0 | 36,3 | 0,675 | 62,8 | 1,0236 | 1,340 | 33,3 | 0,580 |
| 500  | 61,5 | 40,0 | 0,682 | 79,6 | 1,0484 | 1,364 | 42,0 | 0,504 |
| 600  | 67,5 | 43,5 | 0,689 | 97,6 | 1,0689 | 1,321 | 50,8 | 0,447 |
| 700  | 72,8 | 46,8 | 0,700 | 117  | 1,0856 | 1,314 | 60,8 | 0,402 |
| 800  | 77,7 | 50,2 | 0,710 | 138  | 1,0999 | 1,307 | 70,0 | 0,363 |
| 900  | 82,0 | 53,4 | 0,725 | 161  | 1,1120 | 1,304 | 79,7 | 0,333 |
| 1000 | 85,8 | 56,5 | 0,738 | 184  | 1,1229 | 1,300 | 90,0 | 0,306 |

## Оксид углерода (CO)

|      |      |      |       |      |        |       |      |       |
|------|------|------|-------|------|--------|-------|------|-------|
| 0    | 23,3 | 16,6 | 0,740 | 13,3 | 1,0396 | 1,400 | 6,46 | 1,250 |
| 100  | 30,1 | 20,7 | 0,718 | 22,6 | 1,0446 | 1,397 | 11,3 | 0,916 |
| 200  | 36,5 | 24,4 | 0,708 | 33,8 | 1,0584 | 1,389 | 17,9 | 0,723 |
| 300  | 42,6 | 27,9 | 0,709 | 47,0 | 1,0802 | 1,379 | 23,8 | 0,596 |
| 400  | 48,5 | 31,2 | 0,711 | 61,8 | 1,1057 | 1,367 | 31,1 | 0,508 |
| 500  | 54,1 | 34,4 | 0,720 | 78,0 | 1,1321 | 1,354 | 38,9 | 0,442 |
| 600  | 59,7 | 37,4 | 0,727 | 96,0 | 1,1568 | 1,344 | 47,4 | 0,392 |
| 700  | 65,0 | 40,4 | 0,706 | 115  | 1,1790 | 1,335 | 56,6 | 0,351 |
| 800  | 70,1 | 43,2 | 0,739 | 135  | 1,1987 | 1,329 | 66,7 | 0,317 |
| 900  | 75,5 | 46,0 | 0,740 | 157  | 1,2158 | 1,321 | 76,8 | 0,291 |
| 1000 | 80,6 | 48,7 | 0,744 | 180  | 1,2305 | 1,317 | 88,1 | 0,268 |

Таблица 1-5

Теплофизические свойства газов в зависимости от температуры (трехатомные газы)

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\lambda \cdot 10^8$ ,<br>Вт/(м·°C) | $\eta \cdot 10^8$ ,<br>Н·с/м² | $Pr$ | $\nu \cdot 10^8$ ,<br>м²/с | $c_p$ ,<br>кДж/(кг·°C) | $\frac{c_p}{c_v} = k$ | $\alpha \cdot 10^8$ ,<br>м²/ч | $\rho$ , кг/м³ |
|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------|------|----------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------|
|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------|------|----------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------|

Водяной пар (H<sub>2</sub>O)

|      |       |      |      |      |       |      |      |       |
|------|-------|------|------|------|-------|------|------|-------|
| 100  | 23,7  | 12,0 | 1,06 | 19,4 | 2,102 | 1,28 | 6,92 | 0,588 |
| 200  | 33,5  | 15,9 | 0,94 | 30,6 | 1,976 | 1,30 | 13,2 | 0,464 |
| 300  | 44,2  | 20,0 | 0,91 | 44,3 | 2,014 | 1,29 | 20,6 | 0,384 |
| 400  | 55,9  | 24,3 | 0,90 | 60,5 | 2,073 | 1,28 | 29,8 | 0,326 |
| 500  | 68,4  | 28,6 | 0,90 | 78,8 | 2,135 | 1,27 | 40,6 | 0,284 |
| 600  | 81,8  | 33,1 | 0,89 | 99,8 | 2,206 | 1,26 | 53,1 | 0,252 |
| 700  | 95,6  | 37,8 | 0,90 | 122  | 2,273 | 1,25 | 67,0 | 0,226 |
| 800  | 110,3 | 42,6 | 0,91 | 147  | 2,345 | 1,25 | 82,9 | 0,204 |
| 900  | 124,4 | 47,5 | 0,92 | 174  | 2,416 | 1,24 | 99,3 | 0,187 |
| 1000 | 140,7 | 52,4 | 0,92 | 204  | 2,483 | 1,23 | 119  | 0,172 |

Двуокись серы (SO<sub>2</sub>)

|      |      |      |       |      |       |       |      |       |
|------|------|------|-------|------|-------|-------|------|-------|
| 0    | 8,4  | 12,1 | 0,874 | 4,14 | 0,607 | 1,272 | 1,70 | 2,926 |
| 100  | 12,3 | 16,1 | 0,863 | 7,51 | 0,662 | 1,243 | 3,14 | 2,140 |
| 200  | 16,6 | 20,0 | 0,856 | 11,8 | 0,712 | 1,223 | 4,48 | 1,690 |
| 300  | 21,2 | 23,8 | 0,848 | 17,1 | 0,754 | 1,207 | 7,25 | 1,395 |
| 400  | 25,8 | 27,6 | 0,834 | 23,3 | 0,783 | 1,198 | 10,0 | 1,187 |
| 500  | 30,7 | 31,3 | 0,822 | 30,4 | 0,808 | 1,191 | 13,2 | 1,033 |
| 600  | 35,8 | 35,0 | 0,806 | 38,3 | 0,825 | 1,187 | 17,0 | 0,916 |
| 700  | 41,1 | 38,6 | 0,788 | 46,8 | 0,834 | 1,184 | 21,5 | 0,892 |
| 800  | 46,3 | 42,2 | 0,774 | 56,5 | 0,850 | 1,179 | 26,4 | 0,743 |
| 900  | 51,9 | 45,7 | 0,755 | 66,8 | 0,858 | 1,177 | 32,0 | 0,681 |
| 1000 | 57,6 | 49,2 | 0,740 | 78,3 | 0,867 | 1,175 | 38,2 | 0,626 |

Двуокись углерода (CO<sub>2</sub>)

|      |      |      |       |      |        |       |      |        |
|------|------|------|-------|------|--------|-------|------|--------|
| 0    | 14,7 | 14,0 | 0,780 | 7,09 | 0,8148 | 1,301 | 3,28 | 1,9767 |
| 100  | 22,8 | 18,2 | 0,733 | 12,6 | 0,9136 | 1,260 | 6,21 | 1,447  |
| 200  | 30,9 | 22,4 | 0,715 | 19,2 | 0,9927 | 1,235 | 9,83 | 1,143  |
| 300  | 39,1 | 26,4 | 0,712 | 27,3 | 1,0567 | 1,217 | 14,1 | 0,944  |
| 400  | 47,2 | 30,2 | 0,709 | 36,7 | 1,1103 | 1,205 | 19,1 | 0,802  |
| 500  | 54,9 | 34,0 | 0,713 | 47,2 | 1,1547 | 1,195 | 24,6 | 0,698  |
| 600  | 62,1 | 37,7 | 0,723 | 58,3 | 1,1920 | 1,188 | 30,8 | 0,618  |
| 700  | 68,7 | 41,1 | 0,730 | 71,4 | 1,2230 | 1,180 | 36,6 | 0,555  |
| 800  | 75,1 | 44,6 | 0,741 | 85,3 | 1,2493 | 1,177 | 43,2 | 0,502  |
| 900  | 80,9 | 48,2 | 0,757 | 100  | 1,2715 | 1,174 | 49,9 | 0,460  |
| 1000 | 86,3 | 51,5 | 0,770 | 116  | 1,2900 | 1,171 | 56,9 | 0,423  |

Таблица I-6

Углеводороды метанового ряда  $C_nH_{n+2}$ 

| $t, ^\circ C$                            | $\lambda \cdot 10^3$ ,<br>Вт/(м·°C) | $\eta \cdot 10^6$ ,<br>Н·с/м <sup>2</sup> | $Pr$  | $\nu \cdot 10^4$ ,<br>м <sup>2</sup> /с | $\frac{c_p}{c_v}$ ,<br>кДж/(кг·°C) | $\frac{c_p}{c_v} = k$ | $\alpha \cdot 10^2$ ,<br>м <sup>2</sup> /ч | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> |
|------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|-------|-----------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------|----------------------------|
| Метан (CH <sub>4</sub> )                 |                                     |                                           |       |                                         |                                    |                       |                                            |                            |
| 0                                        | 30,7                                | 10,39                                     | 0,734 | 14,5                                    | 2,1654                             | 1,314                 | 7,13                                       | 0,7168                     |
| 100                                      | 46,5                                | 13,24                                     | 0,698 | 25,1                                    | 2,4484                             | 1,268                 | 13,0                                       | 0,525                      |
| 200                                      | 63,7                                | 15,89                                     | 0,703 | 38,2                                    | 2,8068                             | 1,225                 | 19,8                                       | 0,414                      |
| 300                                      | 82,3                                | 18,34                                     | 0,707 | 53,5                                    | 3,1753                             | 1,193                 | 27,3                                       | 0,342                      |
| 400                                      | 102                                 | 20,69                                     | 0,717 | 71,9                                    | 3,5295                             | 1,171                 | 35,8                                       | 0,291                      |
| 500                                      | 122,1                               | 22,95                                     | 0,726 | 90,8                                    | 3,8560                             | 1,155                 | 45,1                                       | 0,253                      |
| 600                                      | 144,2                               | 25,20                                     | 0,726 | 113,0                                   | 4,1529                             | 1,141                 | 55,8                                       | 0,224                      |
| Этан (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )    |                                     |                                           |       |                                         |                                    |                       |                                            |                            |
| 0                                        | 19                                  | 8,60                                      | 0,746 | 6,41                                    | 1,6471                             | 1,202                 | 3,09                                       | 1,342                      |
| 100                                      | 31,9                                | 11,38                                     | 0,738 | 11,6                                    | 2,0674                             | 1,154                 | 5,64                                       | 0,983                      |
| 200                                      | 47,5                                | 14,12                                     | 0,741 | 18,2                                    | 2,4899                             | 1,124                 | 8,85                                       | 0,776                      |
| 300                                      | 65,4                                | 16,79                                     | 0,736 | 26,2                                    | 2,8696                             | 1,105                 | 12,8                                       | 0,640                      |
| 400                                      | 85,5                                | 19,32                                     | 0,726 | 35,6                                    | 3,2138                             | 1,095                 | 17,5                                       | 0,545                      |
| 500                                      | 107,9                               | 21,97                                     | 0,715 | 46,4                                    | 3,5190                             | 1,085                 | 23,3                                       | 0,474                      |
| 600                                      | 132,6                               | 24,52                                     | 0,701 | 58,5                                    | 3,7869                             | 1,077                 | 30,1                                       | 0,420                      |
| Пропан (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )  |                                     |                                           |       |                                         |                                    |                       |                                            |                            |
| 0                                        | 15,2                                | 7,50                                      | 0,762 | 3,81                                    | 1,5495                             | 1,138                 | 1,80                                       | 1,967                      |
| 100                                      | 26,3                                | 10,00                                     | 0,768 | 6,94                                    | 2,0168                             | 1,102                 | 3,26                                       | 1,44                       |
| 200                                      | 40,1                                | 12,45                                     | 0,763 | 10,9                                    | 2,4581                             | 1,083                 | 5,17                                       | 1,14                       |
| 300                                      | 56,2                                | 14,81                                     | 0,748 | 15,8                                    | 2,8345                             | 1,070                 | 7,61                                       | 0,939                      |
| 400                                      | 74,8                                | 17,16                                     | 0,727 | 21,6                                    | 3,1610                             | 0,062                 | 10,7                                       | 0,799                      |
| 500                                      | 95,6                                | 19,42                                     | 0,700 | 28,2                                    | 3,4487                             | 1,057                 | 14,4                                       | 0,694                      |
| 600                                      | 118,6                               | 21,77                                     | 0,678 | 35,6                                    | 3,6974                             | 1,053                 | 18,8                                       | 0,616                      |
| Бутан (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )  |                                     |                                           |       |                                         |                                    |                       |                                            |                            |
| 0                                        | 13,3                                | 6,84                                      | 0,821 | 2,63                                    | 1,5918                             | 1,097                 | 1,16                                       | 2,593                      |
| 100                                      | 23,5                                | 9,26                                      | 0,798 | 4,87                                    | 2,0273                             | 1,075                 | 2,20                                       | 1,90                       |
| 200                                      | 36,5                                | 11,67                                     | 0,784 | 7,78                                    | 2,4556                             | 1,061                 | 3,57                                       | 1,50                       |
| 300                                      | 51,9                                | 14,02                                     | 0,761 | 11,3                                    | 2,8149                             | 1,052                 | 5,37                                       | 1,24                       |
| 400                                      | 69,8                                | 16,38                                     | 0,734 | 15,6                                    | 3,1292                             | 1,046                 | 7,64                                       | 1,05                       |
| 500                                      | 90,2                                | 18,73                                     | 0,706 | 20,5                                    | 3,4043                             | 1,043                 | 10,4                                       | 0,916                      |
| 600                                      | 113,0                               | 21,08                                     | 0,679 | 26,1                                    | 3,6442                             | 1,040                 | 13,7                                       | 0,812                      |
| Пентан (C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> ) |                                     |                                           |       |                                         |                                    |                       |                                            |                            |
| 0                                        | 12,3                                | 6,35                                      | 0,821 | —                                       | 1,5931                             | 1,077                 | —                                          | —                          |
| 100                                      | 22,0                                | 8,65                                      | 0,796 | 3,67                                    | 2,0247                             | 1,060                 | 1,66                                       | 2,355                      |
| 200                                      | 34,1                                | 10,88                                     | 0,781 | 5,90                                    | 2,4476                             | 1,049                 | 2,69                                       | 1,86                       |
| 300                                      | 48,6                                | 13,24                                     | 0,763 | 8,62                                    | 2,7993                             | 1,042                 | 4,08                                       | 1,54                       |
| 400                                      | 65,5                                | 15,49                                     | 0,735 | 11,8                                    | 3,1075                             | 1,037                 | 5,81                                       | 1,31                       |
| 500                                      | 84,7                                | 17,75                                     | 0,708 | 15,6                                    | 3,3771                             | 1,035                 | 7,96                                       | 1,14                       |
| 600                                      | 106,1                               | 20,10                                     | 0,684 | 19,9                                    | 3,6103                             | 1,031                 | 10,5                                       | 1,01                       |

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\lambda \cdot 10^3, \text{Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$ | $\eta \cdot 10^3, \text{Н} \cdot \text{с/м}^2$ | $Pr$ | $\nu \cdot 10^3, \text{м}^2/\text{с}$ | $c_p, \text{кДж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$ | $\frac{c_p}{c_v} = k$ | $\alpha \cdot 10^3, \text{м}^2/\text{ч}$ | $\rho, \text{кг/м}^3$ |
|---------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------|---------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------|------------------------------------------|-----------------------|
|---------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------|---------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------|------------------------------------------|-----------------------|

Гексан ( $\text{C}_6\text{H}_{14}$ )

|     |       |       |       |      |        |       |      |       |
|-----|-------|-------|-------|------|--------|-------|------|-------|
| 0   | 11,2  | 5,90  | 0,841 | —    | 1,6023 | 1,063 | —    | —     |
| 100 | 20,2  | 8,15  | 0,814 | 2,89 | 2,0231 | 1,050 | 12,8 | 2,813 |
| 200 | 32,0  | 10,39 | 0,796 | 4,68 | 2,4438 | 1,040 | 21,2 | 2,220 |
| 300 | 45,9  | 12,65 | 0,769 | 6,92 | 2,7909 | 1,035 | 32,4 | 1,833 |
| 400 | 62,5  | 14,91 | 0,738 | 9,60 | 3,0936 | 1,031 | 46,6 | 1,560 |
| 500 | 81,2  | 17,26 | 0,732 | 12,7 | 3,4415 | 1,029 | 62,7 | 1,355 |
| 600 | 102,6 | 19,52 | 0,632 | 16,2 | 3,5868 | 1,027 | 85,7 | 1,202 |

Гептан ( $\text{C}_7\text{H}_{16}$ )

|     |      |       |       |      |        |       |      |      |
|-----|------|-------|-------|------|--------|-------|------|------|
| 0   | 10,7 | 5,39  | 0,812 | —    | 1,6102 | 1,053 | —    | —    |
| 100 | 19,3 | 17,29 | 0,784 | 2,28 | 2,0197 | 1,042 | 10,5 | 3,27 |
| 200 | 30,5 | 9,62  | 0,771 | 3,72 | 2,4406 | 1,035 | 17,4 | 2,58 |
| 300 | 43,7 | 11,77 | 0,749 | 5,51 | 2,7849 | 1,030 | 26,6 | 2,13 |
| 400 | 59,4 | 13,93 | 0,722 | 7,68 | 3,0832 | 1,027 | 38,4 | 1,81 |
| 500 | 77,3 | 16,08 | 0,695 | 10,1 | 3,3457 | 1,025 | 52,6 | 1,58 |
| 600 | 97,7 | 18,34 | 0,670 | 13,0 | 3,5697 | 1,023 | 70,4 | 1,40 |

Октан ( $\text{C}_8\text{H}_{18}$ )

|     |      |       |       |      |        |       |      |       |
|-----|------|-------|-------|------|--------|-------|------|-------|
| 0   | 9,8  | 4,93  | 0,816 | —    | 1,6144 | 1,046 | —    | —     |
| 100 | 17,7 | 6,79  | 0,776 | 1,82 | 2,0209 | 1,037 | 8,46 | 3,73  |
| 200 | 27,8 | 8,65  | 0,759 | 2,94 | 2,4488 | 1,030 | 13,9 | 2,945 |
| 300 | 40   | 40,49 | 0,729 | 4,32 | 2,7800 | 1,026 | 21,3 | 2,43  |
| 400 | 54,3 | 12,36 | 0,700 | 5,96 | 3,0756 | 1,023 | 30,7 | 2,07  |
| 500 | 70,6 | 14,32 | 0,677 | 7,88 | 3,3360 | 1,022 | 42,3 | 1,80  |
| 600 | 89,2 | 16,18 | 0,646 | 10,1 | 3,5571 | 1,020 | 56,8 | 1,59  |

Таблица I-7

## Многоатомные газы

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\lambda \cdot 10^3, \text{Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$ | $\eta \cdot 10^3, \text{Н} \cdot \text{с/м}^2$ | $Pr$ | $\nu \cdot 10^3, \text{м}^2/\text{с}$ | $c_p, \text{кДж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$ | $\frac{c_p}{c_v} = k$ | $\alpha \cdot 10^3, \text{м}^2/\text{ч}$ | $\rho, \text{кг/м}^3$ |
|---------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------|---------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------|------------------------------------------|-----------------------|
|---------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------|---------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------|------------------------------------------|-----------------------|

Аммиак ( $\text{NH}_3$ )

|      |       |       |       |      |       |      |      |        |
|------|-------|-------|-------|------|-------|------|------|--------|
| 0    | 21,1  | 9,36  | 0,908 | 12,2 | 2,043 | 0,31 | 4,81 | 0,7714 |
| 100  | 34,0  | 13,04 | 0,852 | 23,2 | 2,219 | 1,28 | 9,78 | 0,564  |
| 200  | 48,8  | 16,67 | 0,818 | 38,0 | 2,399 | 1,26 | 16,5 | 0,445  |
| 300  | 65,5  | 20,59 | 0,812 | 56,4 | 2,583 | 1,24 | 24,8 | 0,368  |
| 400  | 84,0  | 24,32 | 0,796 | 78,7 | 2,747 | 1,22 | 35,1 | 0,313  |
| 500  | 103,6 | 28,15 | 0,793 | 105  | 2,918 | 1,20 | 47,0 | 0,272  |
| 600  | 124,4 | 31,97 | 0,792 | 134  | 3,082 | 1,19 | 60,6 | 0,241  |
| 700  | 147,7 | 35,99 | 0,791 | 168  | 3,245 | 1,18 | 75,8 | 0,217  |
| 800  | 171,0 | 39,81 | 0,793 | 205  | 3,404 | 1,17 | 92,7 | 0,196  |
| 900  | 196,5 | 44,13 | 0,798 | 247  | 3,555 | 1,16 | 111  | 0,179  |
| 1000 | 222,1 | 47,86 | 0,800 | 291  | 3,709 | 1,15 | 131  | 0,165  |

| $t, ^\circ\text{C}$                       | $\lambda \cdot 10^8$<br>$\text{Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$ | $\eta \cdot 10^3$<br>$\text{Н} \cdot \text{с/м}^2$ | $Pr$  | $\nu \cdot 10^4$<br>$\text{м}^2/\text{с}$ | $c_p$<br>$\text{кДж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$ | $\frac{c_p}{c_v} = k$ | $\alpha \cdot 10^3$<br>$\text{м}^2/\text{ч}$ | $\rho$ , $\text{кг/м}^3$ |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------|----------------------------------------------|--------------------------|
| Ацетон ( $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ ) |                                                              |                                                    |       |                                           |                                                 |                       |                                              |                          |
| 0                                         | 9,7                                                          | 6,86                                               | 0,386 | —                                         | 1,256                                           | 1,130                 | —                                            | —                        |
| 100                                       | 17,3                                                         | 9,41                                               | 0,840 | 5,07                                      | 1,537                                           | 1,103                 | 2,18                                         | 1,87                     |
| 200                                       | 26,9                                                         | 12,06                                              | 0,806 | 8,22                                      | 1,788                                           | 1,086                 | 3,68                                         | 1,47                     |
| 300                                       | 38,6                                                         | 14,71                                              | 0,774 | 12,1                                      | 2,022                                           | 1,076                 | 5,64                                         | 1,22                     |
| 400                                       | 52,1                                                         | 17,36                                              | 0,743 | 16,9                                      | 2,236                                           | 1,067                 | 8,15                                         | 1,03                     |
| 500                                       | 67,5                                                         | 20,00                                              | 0,720 | 22,3                                      | 2,428                                           | 1,062                 | 11,1                                         | 0,901                    |
| 600                                       | 84,7                                                         | 22,75                                              | 0,695 | 28,3                                      | 2,587                                           | 1,059                 | 14,7                                         | 0,799                    |
| Бензол ( $\text{C}_6\text{H}_6$ )         |                                                              |                                                    |       |                                           |                                                 |                       |                                              |                          |
| 0                                         | 9,2                                                          | 6,98                                               | 0,716 | —                                         | 0,943                                           | 1,127                 | —                                            | —                        |
| 100                                       | 17,3                                                         | 7,21                                               | 0,554 | 3,74                                      | 1,325                                           | 1,086                 | 1,84                                         | 2,55                     |
| 200                                       | 28,1                                                         | 12,28                                              | 0,719 | 5,99                                      | 1,676                                           | 1,067                 | 3,01                                         | 2,01                     |
| 300                                       | 41,6                                                         | 14,64                                              | 0,688 | 8,80                                      | 1,956                                           | 1,057                 | 4,62                                         | 1,66                     |
| 400                                       | 57,6                                                         | 17,20                                              | 0,652 | 12,1                                      | 2,183                                           | 1,050                 | 6,74                                         | 1,41                     |
| 500                                       | 76,4                                                         | 19,76                                              | 0,614 | 15,9                                      | 2,369                                           | 1,047                 | 9,44                                         | 1,23                     |
| 600                                       | 96,3                                                         | 22,31                                              | 0,585 | 20,4                                      | 2,524                                           | 1,044                 | 12,6                                         | 1,09                     |
| Бромметил ( $\text{CH}_3\text{Br}$ )      |                                                              |                                                    |       |                                           |                                                 |                       |                                              |                          |
| 0                                         | 6,3                                                          | 12,26                                              | 0,819 | —                                         | 0,418                                           | 1,27                  | —                                            | —                        |
| 100                                       | 10,7                                                         | 17,06                                              | 0,838 | 5,49                                      | 0,523                                           | 1,20                  | 2,33                                         | 3,15                     |
| 200                                       | 16                                                           | 21,87                                              | 0,818 | 8,94                                      | 0,595                                           | 1,17                  | 3,94                                         | 2,45                     |
| 300                                       | 22                                                           | 26,77                                              | 0,793 | 13,2                                      | 0,649                                           | 1,15                  | 6,03                                         | 2,02                     |
| 400                                       | 28,8                                                         | 31,77                                              | 0,770 | 18,4                                      | 0,699                                           | 1,14                  | 8,64                                         | 1,72                     |
| 500                                       | 36,5                                                         | 36,68                                              | 0,745 | 24,5                                      | 0,741                                           | 1,13                  | 11,8                                         | 1,50                     |
| 600                                       | 44,9                                                         | 41,68                                              | 0,726 | 31,4                                      | 0,783                                           | 1,13                  | 15,5                                         | 1,38                     |
| Толуол ( $\text{C}_7\text{H}_8$ )         |                                                              |                                                    |       |                                           |                                                 |                       |                                              |                          |
| 0                                         | 13                                                           | 6,609                                              | 0,748 | —                                         | 1,023                                           | 1,097                 | —                                            | —                        |
| 100                                       | —                                                            | 8,855                                              | —     | —                                         | 1,411                                           | 1,068                 | —                                            | —                        |
| 200                                       | —                                                            | 11,013                                             | —     | 4,65                                      | 1,750                                           | 1,054                 | —                                            | 2,38                     |
| 300                                       | —                                                            | 13,239                                             | —     | 6,75                                      | 2,047                                           | 1,045                 | —                                            | 1,96                     |
| 400                                       | —                                                            | 15,396                                             | —     | 9,23                                      | 2,294                                           | 1,040                 | —                                            | 1,667                    |
| 500                                       | —                                                            | 17,456                                             | —     | 12,0                                      | 2,504                                           | 1,036                 | —                                            | 1,45                     |
| 600                                       | —                                                            | 19,613                                             | —     | 15,3                                      | 2,671                                           | 1,034                 | —                                            | 1,28                     |
| Хлорметил ( $\text{CH}_3\text{Cl}$ )      |                                                              |                                                    |       |                                           |                                                 |                       |                                              |                          |
| 0                                         | 9,2                                                          | 9,807                                              | 0,818 | 4,25                                      | 0,770                                           | 1,27                  | 1,86                                         | 2,31                     |
| 100                                       | 15,4                                                         | 13,435                                             | 0,805 | 7,96                                      | 0,921                                           | 1,22                  | 3,55                                         | 1,69                     |
| 200                                       | 24,2                                                         | 17,162                                             | 0,750 | 12,8                                      | 1,059                                           | 1,18                  | 6,17                                         | 1,33                     |
| 300                                       | 33,8                                                         | 20,790                                             | 0,727 | 18,9                                      | 1,185                                           | 1,16                  | 9,39                                         | 1,10                     |
| 400                                       | 45                                                           | 24,517                                             | 0,706 | 26,2                                      | 1,296                                           | 1,15                  | 13,3                                         | 0,938                    |
| 500                                       | 57,5                                                         | 28,243                                             | 0,685 | 34,6                                      | 1,394                                           | 1,13                  | 18,2                                         | 0,815                    |
| 600                                       | 71,3                                                         | 31,969                                             | 0,666 | 44,2                                      | 1,486                                           | 1,12                  | 23,9                                         | 0,723                    |

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\lambda \cdot 10^8, \frac{\text{Вт}}{(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})}$ | $\eta \cdot 10^4, \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$ | $Pr$ | $\nu \cdot 10^6, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ | $c_p, \frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})}$ | $\frac{c_p}{c_v} = k$ | $\alpha \cdot 10^3, \frac{\text{м}^2}{\text{ч}}$ | $\rho, \text{кг/м}^3$ |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------|-----------------------|
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------|-----------------------|

Хлороформ ( $\text{CHCl}_3$ )

|     |      |        |       |      |       |      |      |      |
|-----|------|--------|-------|------|-------|------|------|------|
| 0   | 6,4  | 9,620  | 0,806 | —    | 0,532 | 1,15 | —    | —    |
| 100 | 10   | 12,847 | 0,78  | 3,33 | 0,607 | 1,13 | 1,54 | 3,86 |
| 200 | 14,2 | 16,083 | 0,754 | 5,29 | 0,666 | 1,12 | 2,51 | 3,05 |
| 300 | 18,8 | 19,319 | 0,730 | 7,67 | 0,712 | 1,11 | 3,78 | 2,52 |
| 400 | 23,7 | 22,458 | 0,702 | 10,5 | 0,741 | 1,10 | 5,39 | 2,14 |
| 500 | 29,1 | 25,595 | 0,667 | 13,7 | 0,758 | 1,10 | 7,43 | 1,86 |

Циклогексан ( $\text{C}_6\text{H}_{12}$ )

|     |      |        |       |       |       |       |      |      |
|-----|------|--------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| 0   | 9,7  | 6,384  | 0,718 | —     | 1,094 | 1,100 | —    | —    |
| 100 | 18,1 | 8,296  | 0,768 | 3,075 | 1,647 | 1,064 | 1,44 | 2,75 |
| 200 | 29,2 | 10,503 | 0,769 | 4,84  | 2,139 | 1,049 | 2,26 | 2,17 |
| 300 | 42,8 | 12,504 | 0,749 | 7,00  | 2,566 | 1,040 | 3,35 | 1,79 |
| 400 | 58,8 | 14,475 | 0,723 | 9,50  | 2,938 | 1,033 | 4,74 | 1,52 |
| 500 | 79,3 | 16,034 | 0,656 | 12,4  | 3,246 | 1,030 | 6,67 | 1,32 |
| 600 | 99,4 | 18,338 | 0,646 | 15,7  | 3,502 | 1,027 | 8,74 | 1,17 |

Четыреххлористый углерод ( $\text{CCl}_4$ )

|     |      |       |       |      |       |       |      |       |
|-----|------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|
| 0   | 6    | 9,24  | 0,802 | —    | 0,520 | 1,116 | —    | —     |
| 100 | 8,7  | 12,31 | 0,828 | 2,45 | 0,587 | 1,101 | 1,06 | 5,02  |
| 200 | 11,6 | 15,29 | 0,816 | 3,86 | 0,620 | 1,095 | 1,70 | 3,97  |
| 300 | 14,7 | 18,24 | 0,796 | 5,59 | 0,641 | 1,092 | 2,52 | 3,275 |
| 400 | 17,8 | 21,18 | 0,776 | 7,64 | 0,654 | 1,090 | 3,51 | 2,79  |
| 500 | 21,2 | 24,03 | 0,758 | 9,96 | 0,667 | 1,088 | 4,72 | 2,42  |
| 600 | 24,5 | 26,87 | 0,741 | 12,6 | 0,676 | 1,087 | 6,08 | 2,15  |

Этилацетат ( $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$ )

|     |      |       |       |      |       |       |      |      |
|-----|------|-------|-------|------|-------|-------|------|------|
| 0   | 9,1  | 6,91  | 0,892 | —    | 1,168 | 1,088 | —    | —    |
| 100 | 16,6 | 9,47  | 0,832 | 5,16 | 1,465 | 1,069 | 1,42 | 2,88 |
| 200 | 26,3 | 12,06 | 0,798 | 8,32 | 1,742 | 1,056 | 2,39 | 2,27 |
| 300 | 38,3 | 14,61 | 0,765 | 12,2 | 2,005 | 1,049 | 3,67 | 1,87 |
| 400 | 52,2 | 17,06 | 0,733 | 16,9 | 2,257 | 1,043 | 5,21 | 1,60 |
| 500 | 68,2 | 19,71 | 0,723 | 22,4 | 2,499 | 1,038 | 7,06 | 1,39 |
| 600 | 86,9 | 22,35 | 0,703 | 28,5 | 2,729 | 1,035 | 9,31 | 1,23 |

Этиловый эфир ( $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$ )

|     |       |       |       |      |       |       |       |      |
|-----|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|
| 0   | 13    | 6,16  | 0,766 | —    | 1,440 | 1,084 | —     | —    |
| 100 | 22,8  | 9,28  | 0,748 | 3,83 | 1,842 | 1,065 | 1,844 | 2,42 |
| 200 | 35,2  | 11,67 | 0,736 | 6,12 | 2,223 | 1,053 | 2,990 | 1,91 |
| 300 | 50    | 14,02 | 0,727 | 8,92 | 2,587 | 1,045 | 4,42  | 1,57 |
| 400 | 67,3  | 16,48 | 0,720 | 12,2 | 2,943 | 1,039 | 6,14  | 1,34 |
| 500 | 86,4  | 18,83 | 0,714 | 16,1 | 3,274 | 1,036 | 8,14  | 1,17 |
| 600 | 108,2 | 21,18 | 0,716 | 20,5 | 3,609 | 1,032 | 10,4  | 1,03 |

Таблица I-8

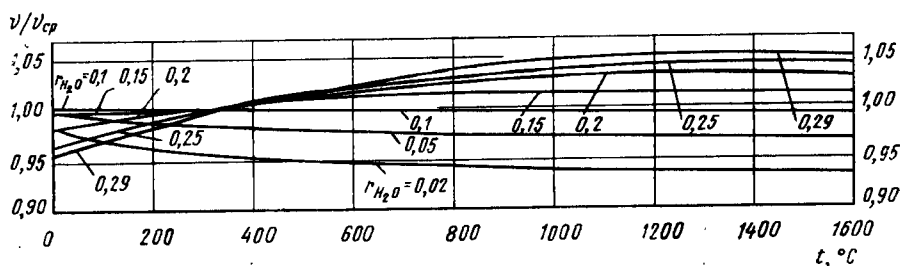
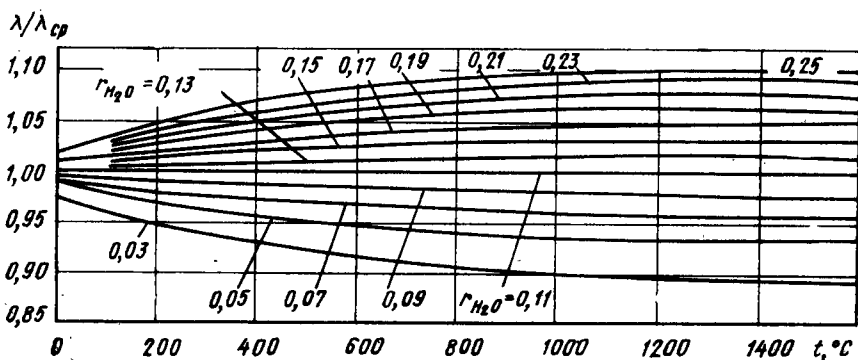
Физические характеристики дымовых газов среднего состава

(11 % водяных паров и 13% углекислого газа) в зависимости от температуры

| °C  | $\lambda$ , Вт/(м·°C) | $\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с | $Pr$ | °C   | $\lambda$ , Вт/(м·°C) | $\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с | $Pr$ |
|-----|-----------------------|--------------------------------------|------|------|-----------------------|--------------------------------------|------|
| 0   | 0,0228                | 12,2                                 | 0,72 | 900  | 0,100                 | 152                                  | 0,59 |
| 100 | 0,0313                | 21,5                                 | 0,69 | 1000 | 0,109                 | 174                                  | 0,58 |
| 200 | 0,0401                | 32,8                                 | 0,67 | 1100 | 0,1175                | 197                                  | 0,57 |
| 300 | 0,0484                | 45,8                                 | 0,65 | 1200 | 0,1255                | 221                                  | 0,56 |
| 400 | 0,057                 | 60,4                                 | 0,64 | 1300 | 0,1350                | 245                                  | 0,55 |
| 500 | 0,0655                | 76,3                                 | 0,63 | 1400 | 0,1442                | 272                                  | 0,54 |
| 600 | 0,0742                | 93,6                                 | 0,62 | 1500 | 0,1535                | 297                                  | 0,53 |
| 700 | 0,0827                | 112                                  | 0,61 | 1600 | 0,1628                | 323                                  | 0,52 |
| 800 | 0,0915                | 132                                  | 0,60 |      |                       |                                      |      |

Примечание. В таблице приведены значения коэффициента теплопроводности  $\lambda_{\text{ср}}$ , коэффициента кинематической вязкости  $\nu_{\text{ср}}$  и критерия Прандтля  $Pr_{\text{ср}}$ . Для дымовых газов другого состава значение, полученное из таблицы, следует умножить на поправку, определенную для коэффициента кинематической вязкости  $\nu/\nu_{\text{ср}}$  — по рис. 1, коэффициента теплопроводности  $\lambda/\lambda_{\text{ср}}$  — по рис. 2 и критерия Прандтля  $Pr/Pr_{\text{ср}}$  — по рис. 3.

Поправки определяют в зависимости от температуры дымовых газов  $t$  и парциального давления в них водяных паров  $r_{\text{H}_2\text{O}}$ .

Рис. 1. Поправка для определения вязкости  $\nu$  дымовых газов в зависимости от влажности  $r_{\text{H}_2\text{O}}$  и температуры  $t$ Рис. 2. Поправка для определения теплопроводности дымовых газов в зависимости от их влажности  $r_{\text{H}_2\text{O}}$  и температуры  $t$

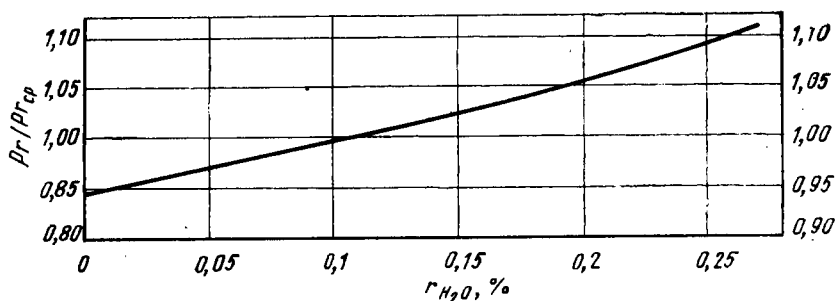


Рис. 3. Поправка для определения критерия Прандтля  $P_r$  для дымовых газов в зависимости от влажности  $r_{H_2O}$

Таблица I-9

Теплоемкость<sup>1</sup> некоторых газов

| $t, ^\circ\text{C}$                                 | $c_p, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ | $t, ^\circ\text{C}$                                | $c_p, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ |
|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| <b>Ацетилен <math>\text{C}_2\text{H}_2</math></b>   |                                                  | 500                                                | 1,086                                            |
| 0                                                   | 1,609                                            | 600                                                | 1,109                                            |
| 100                                                 | 1,870                                            | 700                                                | 1,128                                            |
| 200                                                 | 2,044                                            | 800                                                | 1,146                                            |
| 300                                                 | 2,174                                            | 900                                                | 1,159                                            |
| 400                                                 | 2,282                                            | 1000                                               | 1,172                                            |
| 500                                                 | 2,376                                            | 1100                                               | 1,182                                            |
| 600                                                 | 2,461                                            | 1200                                               | 1,191                                            |
| <b>Закись азота <math>\text{N}_2\text{O}</math></b> |                                                  | <b>Сероводород <math>\text{H}_2\text{S}</math></b> |                                                  |
| 0                                                   | 0,851                                            | 0                                                  | 0,992                                            |
| 100                                                 | 0,949                                            | 100                                                | 1,026                                            |
| 200                                                 | 1,028                                            | 200                                                | 1,067                                            |
| 300                                                 | 1,093                                            | 300                                                | 1,122                                            |
| 400                                                 | 1,147                                            | 400                                                | 1,172                                            |
| 500                                                 | 1,193                                            | 500                                                | 1,227                                            |
| 600                                                 | 1,231                                            | 600                                                | 1,273                                            |
| 700                                                 | 1,263                                            | 700                                                | 1,319                                            |
| 800                                                 | 1,291                                            | 800                                                | 1,361                                            |
| 900                                                 | 1,315                                            | 900                                                | 1,398                                            |
| 1000                                                | 1,335                                            | 1000                                               | 1,482                                            |
| 1100                                                | 1,353                                            | 1100                                               | 1,461                                            |
| 1200                                                | 1,369                                            | 1200                                               | 1,482                                            |
| <b>Окись азота <math>\text{NO}</math></b>           |                                                  | <b>Этилен <math>\text{C}_2\text{H}_4</math></b>    |                                                  |
| 0                                                   | 0,999                                            | 0                                                  | 1,489                                            |
| 100                                                 | 0,997                                            | 100                                                | 1,827                                            |
| 200                                                 | 1,011                                            | 200                                                | 2,176                                            |
| 300                                                 | 1,035                                            | 300                                                | 2,478                                            |
| 400                                                 | 1,061                                            | 400                                                | 2,736                                            |
|                                                     |                                                  | 500                                                | 2,958                                            |
|                                                     |                                                  | 600                                                | 3,153                                            |

<sup>1</sup> Здесь и ниже имеется в виду удельная теплоемкость.

Таблица 1-10

Средние теплоемкости газов  $c_{\text{ср}}$ , кДж/(м<sup>3</sup>·°C)

| $t, ^\circ\text{C}$ | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | CO    | H <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> O | SO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | Воздух<br>сухой | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | H <sub>2</sub> S | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> |
|---------------------|----------------|----------------|-------|----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|------------------|-------------------------------|
| 0                   | 1,306          | 1,294          | 1,298 | 1,277          | 1,599           | 1,495            | 1,733           | 1,549           | 1,298           | 1,825                         | 1,507            | 2,211                         |
| 100                 | 1,319          | 1,298          | 1,302 | 1,289          | 1,700           | 1,507            | 1,813           | 1,641           | 1,302           | 2,064                         | 1,532            | 2,495                         |
| 200                 | 1,336          | 1,298          | 1,306 | 1,298          | 1,788           | 1,524            | 1,888           | 1,758           | 1,306           | 2,282                         | 1,562            | 2,776                         |
| 300                 | 1,357          | 1,306          | 1,315 | 1,298          | 1,863           | 1,541            | 1,955           | 1,888           | 1,315           | 2,495                         | 1,595            | 3,044                         |
| 400                 | 1,377          | 1,315          | 1,327 | 1,302          | 1,980           | 1,566            | 2,018           | 2,014           | 1,327           | 2,688                         | 1,627            | 3,308                         |
| 500                 | 1,398          | 1,327          | 1,344 | 1,306          | 1,989           | 1,591            | 2,060           | 2,139           | 1,344           | 2,864                         | 1,671            | 3,555                         |
| 600                 | 1,415          | 1,340          | 1,357 | 1,310          | 2,043           | 1,616            | 2,114           | 2,261           | 1,357           | 3,027                         | 1,780            | 3,776                         |
| 700                 | 1,436          | 1,352          | 1,373 | 1,315          | 2,089           | 1,641            | 2,152           | 2,378           | 1,369           | 3,178                         | 1,746            | 3,986                         |
| 800                 | 1,449          | 1,365          | 1,386 | 1,319          | 2,098           | 1,666            | 2,181           | 2,504           | 1,382           | 3,308                         | 1,784            | 4,174                         |
| 900                 | 1,465          | 1,377          | 1,398 | 1,323          | 2,169           | 1,696            | 2,215           | 2,600           | 1,398           | 3,433                         | 1,817            | 4,363                         |
| 1000                | 1,478          | 1,390          | 1,411 | 1,331          | 2,202           | 1,725            | 2,236           | 2,700           | 1,411           | 3,546                         | 1,851            | 4,530                         |
| 1100                | 1,491          | 1,403          | 1,424 | 1,336          | 2,236           | 1,750            | 2,261           | 2,788           | 1,424           | 3,655                         | 1,884            | 4,685                         |
| 1200                | 1,503          | 1,415          | 1,436 | 1,344          | 2,265           | 1,775            | 2,278           | 2,864           | 1,432           | 3,751                         | 1,909            | 4,827                         |
| 1300                | 1,511          | 1,424          | 1,449 | 1,352          | 2,290           | 1,805            | 2,299           | 2,889           | 1,444           | —                             | —                | —                             |
| 1400                | 1,520          | 1,436          | 1,457 | 1,361          | 2,315           | 1,830            | 2,319           | 2,960           | 1,453           | —                             | —                | —                             |
| 1500                | 1,528          | 1,444          | 1,465 | 1,369          | 2,336           | 1,855            | 2,340           | 3,044           | 1,470           | —                             | —                | —                             |
| 1600                | 1,537          | 1,453          | 1,474 | 1,373          | 2,374           | 1,876            | 2,361           | —               | 1,478           | —                             | —                | —                             |
| 1700                | 1,545          | 1,461          | 1,482 | 1,382          | 2,374           | 1,901            | 2,382           | —               | 1,486           | —                             | —                | —                             |
| 1800                | 1,553          | 1,470          | 1,491 | 1,390          | 2,391           | 1,922            | —               | —               | 1,922           | —                             | —                | —                             |
| 1900                | 1,562          | 1,474          | 1,499 | 1,398          | 2,407           | 1,943            | —               | —               | 1,499           | —                             | —                | —                             |
| 2000                | 1,570          | 1,482          | 1,503 | 1,407          | 2,424           | 1,964            | —               | —               | 1,507           | —                             | —                | —                             |
| 2100                | 1,574          | 1,491          | 1,511 | 1,415          | 2,437           | 1,985            | —               | —               | 1,516           | —                             | —                | —                             |
| 2200                | 1,583          | 1,495          | 1,516 | 1,424          | 2,449           | 2,001            | —               | —               | 1,520           | —                             | —                | —                             |
| 2300                | 1,591          | 1,503          | 1,520 | 1,432          | 2,462           | 2,018            | —               | —               | 1,624           | —                             | —                | —                             |
| 2400                | 1,595          | 1,507          | 1,528 | 1,436          | 2,470           | 2,035            | —               | —               | 1,532           | —                             | —                | —                             |
| 2500                | 1,604          | 1,511          | 1,532 | 1,444          | 2,483           | 2,052            | —               | —               | 1,537           | —                             | —                | —                             |
| 2600                | 1,608          | 1,520          | 1,537 | 1,453          | 2,520           | 2,068            | —               | —               | 1,545           | —                             | —                | —                             |
| 2700                | 1,616          | 1,528          | 1,545 | 1,461          | 2,533           | 2,085            | —               | —               | 1,553           | —                             | —                | —                             |
| 2800                | 1,624          | 1,537          | 1,553 | 1,465          | 2,546           | 2,102            | —               | —               | 1,557           | —                             | —                | —                             |
| 2900                | 1,629          | 1,545          | 1,562 | 1,474          | 2,558           | 2,114            | —               | —               | 1,566           | —                             | —                | —                             |
| 3000                | 1,637          | 1,549          | 1,570 | 1,482          | 2,571           | 2,127            | —               | —               | 1,570           | —                             | —                | —                             |

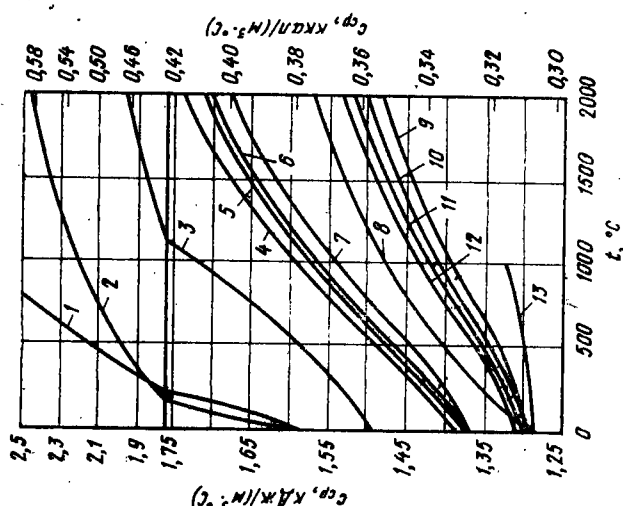


Рис. 4. Зависимость средних теплоемкостей  $c_{\text{ср}}$  различных газов и продуктов сгорания от температуры  $t$ :  
 1 — CH<sub>4</sub>; 2 — CO; 3 — H<sub>2</sub>O; 4 — дымовые газы от бурного угля и дерева; 5 — дымовые газы от торфа; 6 — дымовые газы от кокса, спекающегося антрацита; 7 — дымовые газы от коксового светлого газа; 8 — дымовые газы от коксового воздуха; 9 — кислород; 10 — азот; 11 — сухой воздух; 12 — воздух влажностью 1,04%; 13 — водород

Таблица 1-11

Удельная энтальпия газов  $i$ , кДж/м<sup>3</sup>

| $t$ , °C | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | CO     | H <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> O | SO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | Воздух<br>сухой | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | H <sub>2</sub> S | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> |
|----------|----------------|----------------|--------|----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|------------------|-------------------------------|
| 0        | 0,0            | 0,0            | 0,0    | 0,0            | 0,0             | 0,0              | 0,0             | 0,0             | 0,0             | 0,0                           | 0,0              | 0,0                           |
| 100      | 131,9          | 129,8          | 130,2  | 129,0          | 170,0           | 150,70           | 181,3           | 164,1           | 130,2           | 206,4                         | 153,2            | 248,7                         |
| 200      | 267,1          | 259,6          | 261,3  | 259,6          | 357,6           | 304,8            | 377,6           | 351,7           | 261,3           | 456,4                         | 312,3            | 552,7                         |
| 300      | 404,07         | 391,9          | 394,4  | 389,4          | 558,9           | 462,2            | 586,6           | 566,5           | 394,4           | 748,6                         | 478,6            | 913,1                         |
| 400      | 551,0          | 525,9          | 530,9  | 520,8          | 772,0           | 626,3            | 807,2           | 805,5           | 530,9           | 1075,2                        | 655,1            | 1023,0                        |
| 500      | 699,2          | 663,4          | 672,0  | 653,1          | 994,4           | 795,5            | 1034,1          | 1069,7          | 672,0           | 1431,9                        | 833,2            | 1777,3                        |
| 600      | 849,1          | 803,9          | 813,9  | 786,3          | 1225,9          | 969,7            | 1268,6          | 1356,5          | 813,9           | 1816,2                        | 1024,9           | 2265,9                        |
| 700      | 1005,3         | 946,6          | 961,3  | 923,0          | 1462,4          | 1148,9           | 1506,4          | 1664,7          | 958,4           | 2218,6                        | 1222,1           | 2790,1                        |
| 800      | 1158,9         | 1091,9         | 1108,7 | 1055,1         | 1678,1          | 1333,1           | 1745,1          | 1996,3          | 1105,3          | 2646,1                        | 1426,9           | 3339,4                        |
| 900      | 1318,8         | 1239,7         | 1258,6 | 1190,7         | 1951,9          | 1526,1           | 1993,3          | 2340,0          | 1258,6          | 3089,9                        | 1605,2           | 3926,4                        |
| 1000     | 1477,9         | 1390,0         | 1410,9 | 1331,4         | 2202,3          | 1725,0           | 2235,8          | 2700,5          | 1410,9          | 3546,2                        | 1850,6           | 4530,1                        |
| 1100     | 1639,6         | 1542,8         | 1565,9 | 1489,1         | 2459,3          | 1929,3           | 2487,0          | 3067,2          | 1565,9          | 4020,6                        | 2072,5           | 5154,0                        |
| 1200     | 1803,7         | 1698,2         | 1723,3 | 1612,8         | 2718,1          | 2130,2           | 2733,1          | 3436,5          | 1718,3          | 4500,8                        | 2291,0           | 5790,3                        |
| 1300     | 1964,9         | 1850,7         | 1883,2 | 1758,0         | 2977,2          | 2345,9           | 2988,1          | 3755,6          | 1877,8          | —                             | —                | —                             |
| 1400     | 2127,7         | 2010,5         | 2039,8 | 1905,0         | 3241,4          | 2561,5           | 3247,3          | 4144,1          | 2033,9          | —                             | —                | —                             |
| 1500     | 2292,3         | 2166,7         | 2198,1 | 2053,6         | 3504,4          | 2782,1           | 3510,6          | 4546,9          | 2204,4          | —                             | —                | —                             |
| 1600     | 2458,5         | 2324,5         | 2358,0 | 2197,2         | 3770,6          | 3001,1           | 3778,2          | —               | 2364,7          | —                             | —                | —                             |
| 1700     | 2626,4         | 2484,0         | 2519,6 | 2348,8         | 4035,7          | 3231,4           | 4049,9          | —               | 2526,7          | —                             | —                | —                             |
| 1800     | 2796,0         | 2645,2         | 2682,9 | 2602,0         | 4304,0          | 3459,1           | —               | —               | 2690,4          | —                             | —                | —                             |
| 1900     | 2967,2         | 2804,3         | 2847,9 | 2656,9         | 4572,0          | 3691,1           | —               | —               | 2847,9          | —                             | —                | —                             |
| 2000     | 3140,1         | 2964,3         | 3006,1 | 2813,5         | 4848,3          | 3927,2           | —               | —               | 3014,5          | —                             | —                | —                             |
| 2100     | 3305,9         | 3130,1         | 3174,0 | 2971,8         | 5116,3          | 4167,5           | —               | —               | 3182,8          | —                             | —                | —                             |
| 2200     | 3481,7         | 3288,3         | 3334,4 | 3131,7         | 5388,4          | 4404,5           | —               | —               | 3343,6          | —                             | —                | —                             |
| 2300     | 3659,3         | 3457,0         | 3495,6 | 3293,3         | 5660,6          | 4643,2           | —               | —               | 3505,2          | —                             | —                | —                             |
| 2400     | 3828,4         | 3617,4         | 3667,6 | 3446,6         | 5920,1          | 4881,8           | —               | —               | 3677,7          | —                             | —                | —                             |
| 2500     | 4008,9         | 3778,6         | 3830,9 | 3611,1         | 6209,0          | 5128,8           | —               | —               | 3841,4          | —                             | —                | —                             |
| 2600     | 4180,1         | 3951,5         | 3995,0 | 3777,3         | 6552,3          | 5375,9           | —               | —               | 4016,8          | —                             | —                | —                             |
| 2700     | 4362,6         | 4126,1         | 4171,3 | 3945,2         | 6837,0          | 5631,2           | —               | —               | 4195,2          | —                             | —                | —                             |
| 2800     | 4546,7         | 4304,0         | 4350,1 | 4103,1         | 7125,9          | 5886,6           | —               | —               | 4362,6          | —                             | —                | —                             |
| 2900     | 4722,7         | 4479,9         | 4530,1 | 4274,7         | 7419,0          | 6133,7           | —               | —               | 4542,7          | —                             | —                | —                             |
| 3000     | 4911,1         | 4647,3         | 4710,2 | 4446,4         | 7712,1          | 6380,7           | —               | —               | 4710,2          | —                             | —                | —                             |

Таблица I-12

## Вязкость некоторых газов

| $t, ^\circ\text{C}$                                            | $\eta \cdot 10^6, \text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ | $t, ^\circ\text{C}$                                      | $\eta \cdot 10^6, \text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ | $t, ^\circ\text{C}$                              | $\eta \cdot 10^6, \text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| <b>Ацетилен <math>\text{C}_2\text{H}_2</math></b>              |                                                       | 200                                                      | 12,95                                                 | 150                                              | 24,81                                                 |
| 20                                                             | 10,19                                                 | 300                                                      | 15,69                                                 | 200                                              | 26,77                                                 |
| 50                                                             | 11,08                                                 | <b>Метиленхлорид <math>\text{CH}_2\text{Cl}_2</math></b> |                                                       | 250                                              | 28,83                                                 |
| 100                                                            | 12,45                                                 | 0                                                        | 10,00                                                 | <b>Хлористый водород <math>\text{HCl}</math></b> |                                                       |
| 120                                                            | 13,24                                                 | 100                                                      | 13,63                                                 | 0                                                | 13,44                                                 |
| <b>Закись азота <math>\text{N}_2\text{O}</math></b>            |                                                       | 200                                                      | 17,26                                                 | 50                                               | 15,89                                                 |
| 0                                                              | 13,72                                                 | 300                                                      | 20,99                                                 | 100                                              | 18,24                                                 |
| 20                                                             | 14,61                                                 | <b>Метилхлорид <math>\text{CH}_3\text{Cl}</math></b>     |                                                       | 150                                              | 20,59                                                 |
| 50                                                             | 15,98                                                 | 0                                                        | 9,28                                                  | 200                                              | 22,95                                                 |
| 100                                                            | 18,34                                                 | 100                                                      | 12,45                                                 | 250                                              | 25,30                                                 |
| 150                                                            | 20,39                                                 | 200                                                      | 15,79                                                 | 300                                              | 27,65                                                 |
| 200                                                            | 22,56                                                 | <b>Этилен <math>\text{C}_2\text{H}_4</math></b>          |                                                       | 20                                               | 10,00                                                 |
| 250                                                            | 24,61                                                 | 0                                                        | 17,85                                                 | 50                                               | 10,98                                                 |
| 300                                                            | 26,48                                                 | 50                                                       | 20,39                                                 | 100                                              | 12,45                                                 |
| <b>Метилацетат <math>\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2</math></b> |                                                       | 100                                                      | 22,65                                                 | 150                                              | 14,02                                                 |
| 0                                                              | 7,52                                                  | <b>Окись азота <math>\text{NO}</math></b>                |                                                       | 200                                              | 15,39                                                 |
| 100                                                            | 10,29                                                 | 0                                                        | 17,85                                                 | 250                                              | 16,57                                                 |
|                                                                |                                                       | 50                                                       | 20,39                                                 |                                                  |                                                       |
|                                                                |                                                       | 100                                                      | 22,65                                                 |                                                  |                                                       |

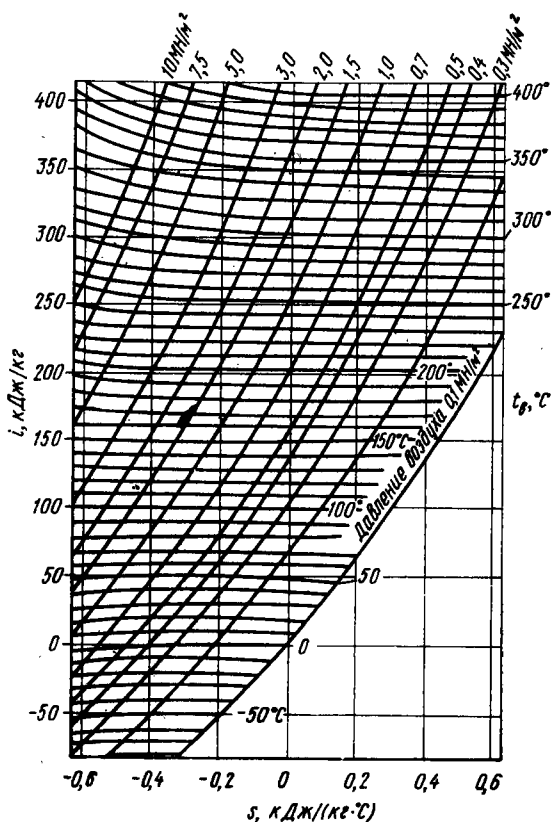


Рис. 5. Диаграмма  $s-i$  для воздуха:  $t_{\text{в}}$  — температура воздуха;  $i$  — энтальпия;  $s$  — энтропия;  $v$  — удельный объем;  $p$  — удельное давление;  $t$  — температура

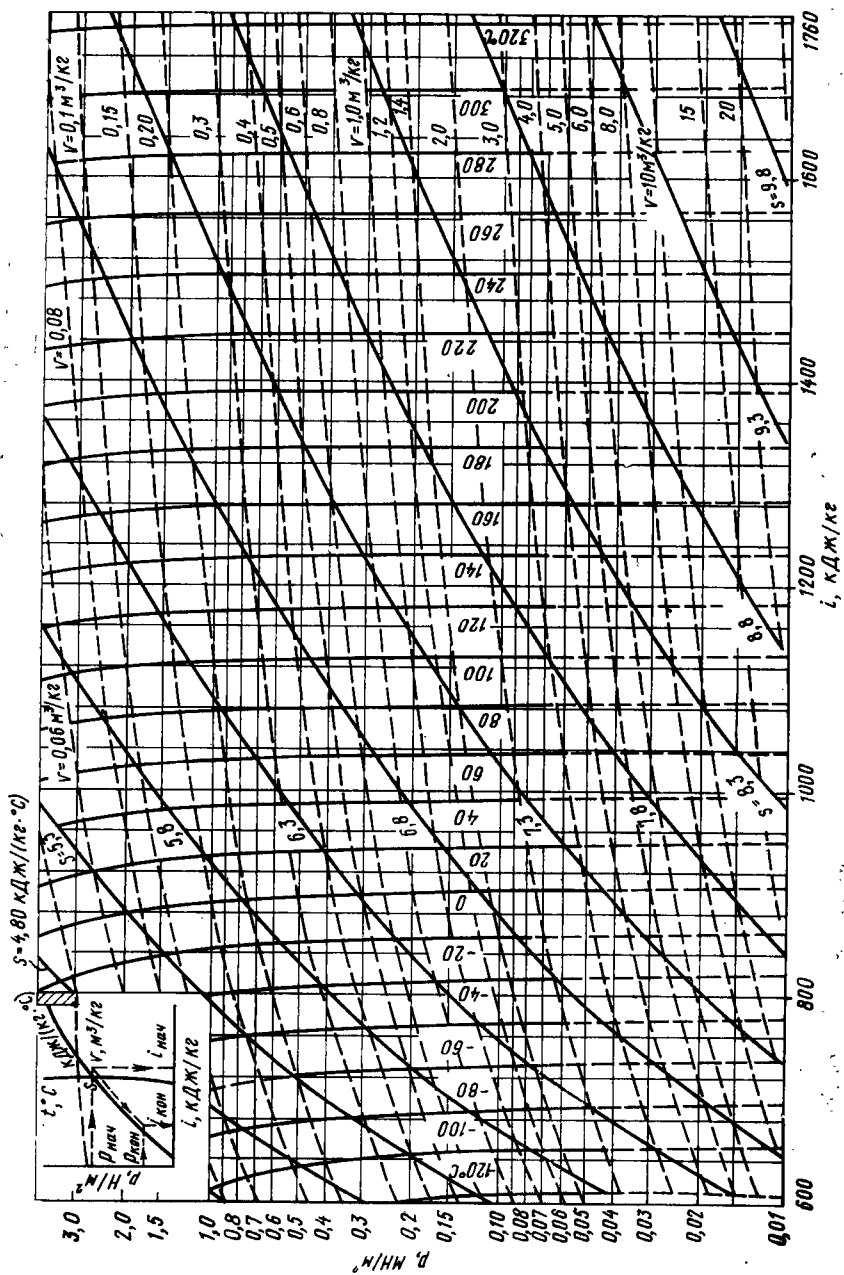


Рис. 6. Диаграмма состояния метана  $\text{CH}_4$  в координатах  $i$ - $p$

Таблица I-13

Давление насыщенного водяного пара и содержание влаги в 1 м³ влажного газа

| Температура, °C | Давление водяного пара, Н/м² | Содержание влаги в 1 м³ газа |            | Температура, °C | Давление водяного пара, Н/м² | Содержание влаги в 1 м³ газа |            | Температура, °C | Давление водяного пара, Н/м² | Содержание влаги в 1 м³ газа |            |
|-----------------|------------------------------|------------------------------|------------|-----------------|------------------------------|------------------------------|------------|-----------------|------------------------------|------------------------------|------------|
|                 |                              | г                            | % (объем.) |                 |                              | г                            | % (объем.) |                 |                              | г                            | % (объем.) |
| -15             | 191,4                        | 1,52                         | 0,189      | 4               | 813,3                        | 6,46                         | 0,804      | 26              | 3360,5                       | 26,70                        | 3,32       |
| -14             | 207,9                        | 1,65                         | 0,205      | 5               | 872,2                        | 6,91                         | 0,860      | 28              | 3779,1                       | 30,00                        | 3,73       |
| -13             | 225,4                        | 1,79                         | 0,223      | 6               | 934,8                        | 7,42                         | 0,922      | 30              | 4241,6                       | 33,70                        | 4,19       |
| -12             | 244,5                        | 1,92                         | 0,240      | 7               | 1001,5                       | 7,94                         | 0,988      | 32              | 4753,5                       | 37,70                        | 4,69       |
| -11             | 259,7                        | 2,05                         | 0,256      | 8               | 1072,4                       | 8,52                         | 1,06       | 34              | 5318,7                       | 42,20                        | 5,25       |
| -10             | 286,5                        | 2,27                         | 0,283      | 9               | 1147,6                       | 9,10                         | 1,13       | 36              | 5939,8                       | 47,10                        | 5,86       |
| -9              | 310,1                        | 2,45                         | 0,306      | 10              | 1227,6                       | 9,73                         | 1,21       | 38              | 6623,7                       | 52,70                        | 6,55       |
| -8              | 335,1                        | 2,64                         | 0,330      | 11              | 1312,2                       | 10,40                        | 1,29       | 40              | 7374,2                       | 58,50                        | 7,27       |
| -7              | 361,9                        | 2,86                         | 0,356      | 12              | 1402,3                       | 11,10                        | 1,38       | 45              | 9581,6                       | 76,00                        | 9,46       |
| -6              | 390,7                        | 3,06                         | 0,382      | 13              | 1497,0                       | 12,60                        | 1,48       | 50              | 12332,0                      | 97,90                        | 12,18      |
| -5              | 421,6                        | 3,34                         | 0,416      | 14              | 1598,3                       | 12,70                        | 1,58       | 55              | 15729                        | 125,0                        | 15,5       |
| -4              | 454,6                        | 3,60                         | 0,450      | 15              | 1704,9                       | 13,50                        | 1,68       | 60              | 19862                        | 158,0                        | 19,7       |
| -3              | 489,6                        | 3,76                         | 0,469      | 16              | 1816,9                       | 14,40                        | 1,79       | 65              | 24994                        | 198,0                        | 24,7       |
| -2              | 527,3                        | 4,10                         | 0,510      | 17              | 1936,8                       | 15,50                        | 1,93       | 70              | 31152                        | 247,0                        | 30,7       |
| -1              | 567,6                        | 4,53                         | 0,565      | 18              | 2063,5                       | 16,40                        | 2,04       | 75              | 38537                        | 306,0                        | 38,0       |
| ±0              | 610,4                        | 4,84                         | 0,602      | 19              | 2196,8                       | 17,40                        | 2,17       | 80              | 47335                        | 376,0                        | 46,7       |
| 1               | 656,6                        | 5,21                         | 0,648      | 20              | 2338,1                       | 18,50                        | 2,30       | 90              | 70089                        | 555,0                        | 69,1       |
| 2               | 705,7                        | 5,60                         | 0,697      | 22              | 2643,3                       | 21,00                        | 2,61       | 100             | 101308                       | 804,0                        | 100,0      |
| 3               | 757,8                        | 6,01                         | 0,748      | 24              | 2983,3                       | 23,60                        | 2,94       |                 |                              |                              |            |

Таблица I-14

Значение коэффициента объемного расширения  $\beta$  и повышения давления  $\alpha$  для различных газов

| Газ                     | Температура, °C | $p$ , Н/м²  | $\beta \cdot 10^4$ , 1/°C | Газ                   | Температура, °C | $p$ , Н/м² | $\alpha \cdot 10^3$ , 1/°C |
|-------------------------|-----------------|-------------|---------------------------|-----------------------|-----------------|------------|----------------------------|
| При постоянном давлении |                 |             |                           | При постоянном объеме |                 |            |                            |
| Воздух                  | 0—100           | 133300      | 3,6728                    | Воздух                | 0—100           | 133433     | 3,6744                     |
| H <sub>2</sub>          | 0—100           | 133300      | 3,6600                    | »                     | —               | 266600     | 3,690                      |
| H <sub>2</sub>          | 0—100           | 103308      | 3,6609                    | »                     | —               | 2666000    | 3,887                      |
| N <sub>2</sub>          | 0—100           | 147296      | 3,6742                    | »                     | 0—1067          | 30659      | 3,6643                     |
| N <sub>2</sub>          | 0—100           | 20261 · 10³ | 4,34                      | H <sub>2</sub>        | 0—100           | 132500     | 3,6621                     |
| N <sub>2</sub>          | —               | 10131 · 10⁴ | 2,18                      | H <sub>2</sub>        | 0—100           | 133300     | 3,6630                     |
| O <sub>2</sub>          | —               | 10131 · 10³ | 4,86                      | H <sub>2</sub>        | 0—100           | 145297     | 3,6627                     |
| He                      | 0—100           | 132500      | 3,6579                    | N <sub>2</sub>        | 0—100           | 87178      | 3,6696                     |
| CO                      | —               | 101308      | 3,669                     | N <sub>2</sub>        | 0—100           | 132500     | 3,6740                     |
| CO <sub>2</sub>         | 0—20            | 69049       | 3,7128                    | O <sub>2</sub>        | 0—100           | 87978      | 3,6738                     |
| CO <sub>2</sub>         | 0—100           | 69049       | 3,7073                    | O <sub>2</sub>        | 0—1067          | 23994—     | 3,6652                     |
| CO <sub>2</sub>         | 0—20            | 133033      | 3,7602                    |                       |                 | 30659      |                            |
| CO <sub>2</sub>         | 0—100           | 133033      | 3,7410                    | He                    | 0—10            | 130634     | 3,6612                     |
| CO <sub>2</sub>         | 0—20            | 183554      | 3,7972                    | He                    | 0—10            | 132500     | 3,6604                     |
| CO <sub>2</sub>         | 0—100           | 183554      | 3,7703                    | Ar                    | —               | 68916      | 3,668                      |
| N <sub>2</sub> O        | —               | 101308      | 3,719                     | CO                    | 0—100           | 101308     | 3,667                      |
| SO <sub>2</sub>         | —               | 101308      | 3,903                     | CO                    | 0—1067          | 30659      | 3,6648                     |
| При постоянном объеме   |                 |             |                           | CO <sub>2</sub>       | 0—100           | 69049,4    | 3,6981                     |
| Воздух                  | —               | 773,14      | 3,7666                    | CO <sub>2</sub>       | 0—20            | 133033,4   | 3,7335                     |
| »                       | —               | 13330       | 3,6630                    | CO <sub>2</sub>       | 0—100           | 133038,4   | 3,7262                     |
| »                       | —               | 101308      | 3,6650                    | CO <sub>2</sub>       | 0—1067          | 31992      | 3,6756                     |
|                         |                 |             |                           | N <sub>2</sub> O      | —               | 101308     | 3,676                      |

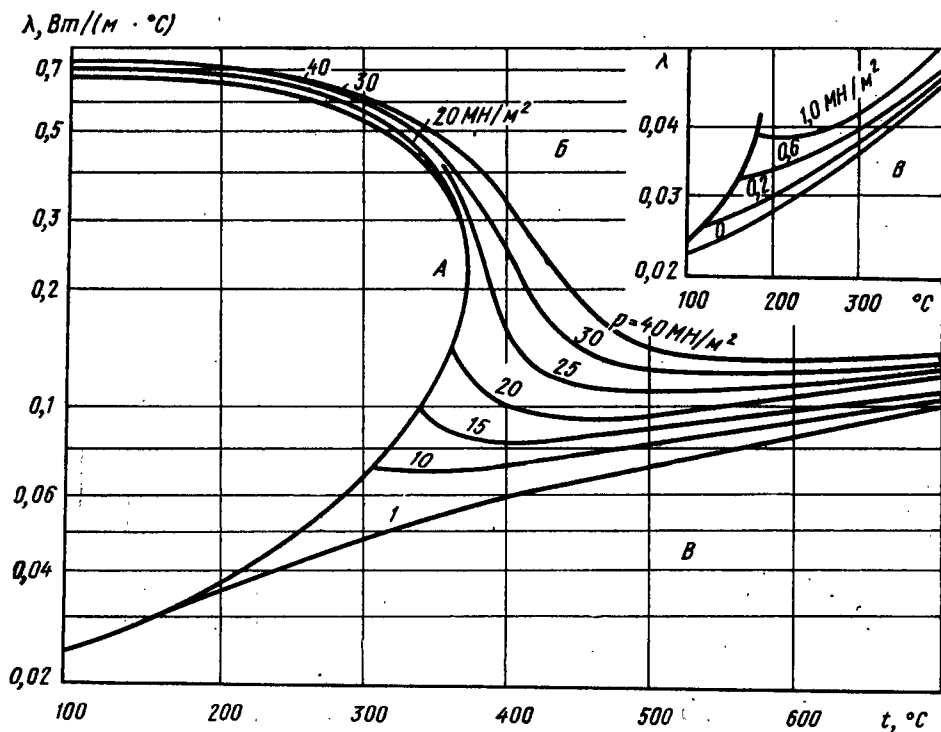


Рис. 7. Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  воды и водяного пара:  
 А — кривая насыщения; Б — область воды; В — область перегретого пара

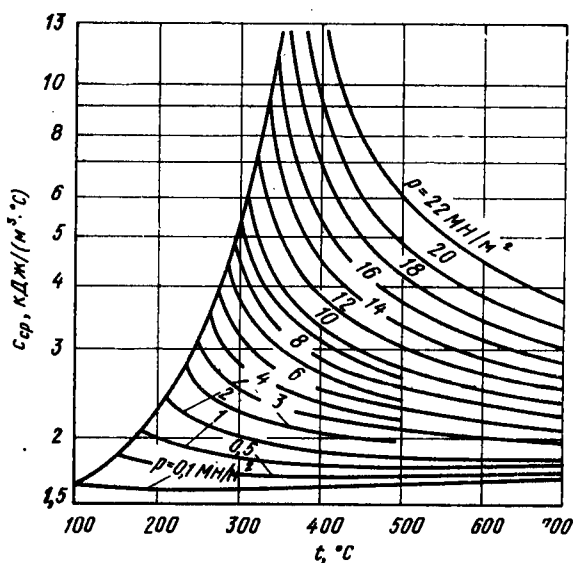


Рис. 8. Средние теплоемкости  $c_{\text{ср}}$  водяного пара

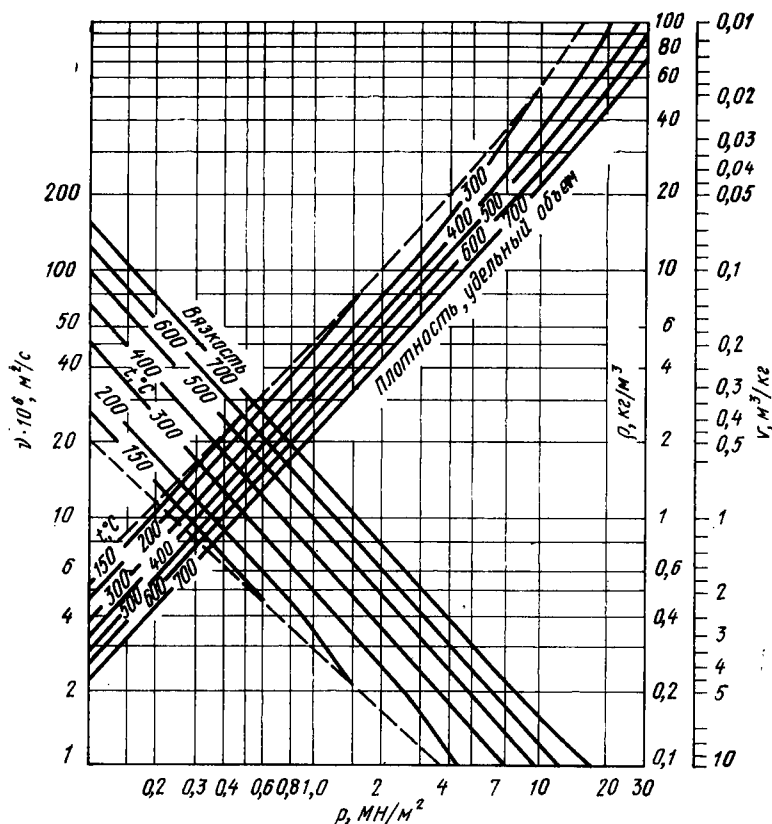


Рис. 9. Зависимость плотности  $\rho$ , удельного объема  $v$  и кинематической вязкости  $\nu$  водяного пара от удельного давления  $p$

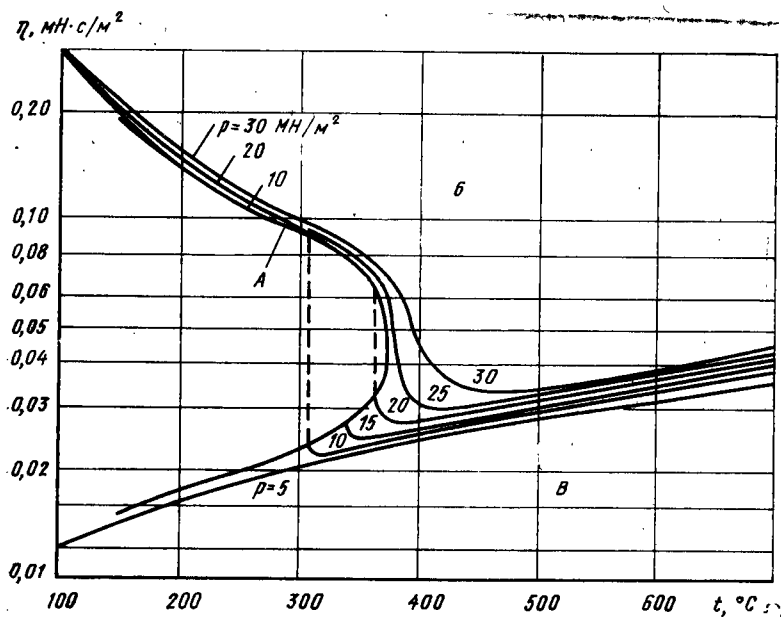


Рис. 10. Зависимость коэффициента вязкости  $\eta$  воды и водяного пара от температуры  $t$ :  
 А — кривая насыщения; Б — область воды; В — область перегретого пара

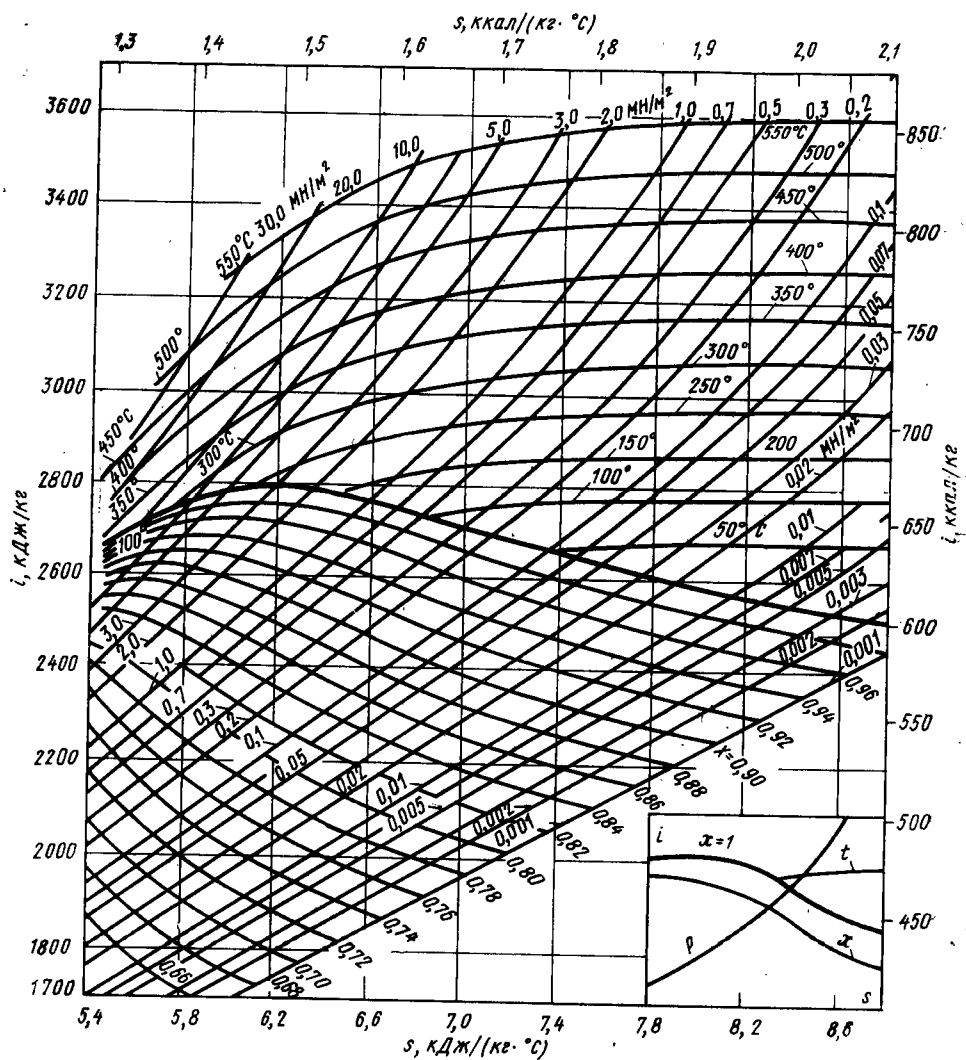


Рис. 11. Диаграмма  $s-i$  водяного пара

# ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

Таблица II-1

Некоторые физические параметры жидкостей

| Наименование                                                              | $t, ^\circ\text{C}$ | Плотность $\rho$ ,<br>$\text{кг/м}^3$ | Коэффициент<br>объемного<br>расширения<br>$\beta \cdot 10^3, 1/^\circ\text{C}$ | Теплоем-<br>кость $c$ ,<br>$\text{кДж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$ | Коэффициент<br>теплопровод-<br>ности<br>$\lambda$ , $\text{Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$ | Коэффициент<br>вязкости $\eta \cdot 10$ ,<br>$\text{Н} \cdot \text{с/м}^2$ |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Азотная кислота . . . . .                                                 | 20                  | 1512                                  | —                                                                              | 1,72                                                              | —                                                                                        | —                                                                          |
| Анилин . . . . .                                                          | 0                   | 1037                                  | 85                                                                             | 2,02                                                              | 0,186                                                                                    | 10,2                                                                       |
| Ацетон . . . . .                                                          | 0                   | 813                                   | —                                                                              | 2,114                                                             | 0,174                                                                                    | 0,395                                                                      |
| Бензин . . . . .                                                          | 0                   | 900                                   | —                                                                              | 1,80                                                              | 0,145                                                                                    | —                                                                          |
| Бензол . . . . .                                                          | 0                   | 900                                   | 124                                                                            | 1,67                                                              | 0,15                                                                                     | 0,76 (10)                                                                  |
| Вода дистиллированная . . . . .                                           | 4                   | 1000                                  | 15                                                                             | 4,187                                                             | 0,55                                                                                     | —                                                                          |
| Глицерин безводный . . . . .                                              | 0                   | 1260                                  | 53                                                                             | 2,43                                                              | 0,277                                                                                    | 12100                                                                      |
| Касторовое масло . . . . .                                                | 0                   | —                                     | —                                                                              | —                                                                 | 0,184                                                                                    | 2440 (10)                                                                  |
| Ксилол . . . . .                                                          | 0                   | 880                                   | —                                                                              | 1,72 (20)                                                         | 0,137                                                                                    | —                                                                          |
| Керосин . . . . .                                                         | 0                   | 850                                   | —                                                                              | 2,43                                                              | 0,121                                                                                    | —                                                                          |
| Льняное вареное масло . . . . .                                           | 15                  | 940                                   | —                                                                              | —                                                                 | —                                                                                        | —                                                                          |
| Машинное масло . . . . .                                                  | —                   | —                                     | —                                                                              | 1,67                                                              | —                                                                                        | —                                                                          |
| Мазут . . . . .                                                           | 32                  | —                                     | —                                                                              | —                                                                 | 0,118                                                                                    | —                                                                          |
| Медный купорос (15% $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) . . . . . | 15                  | 1100                                  | —                                                                              | —                                                                 | —                                                                                        | —                                                                          |
| Минеральное смазочное масло . . . . .                                     | 20                  | 890—930                               | —                                                                              | 0,662                                                             | 0,104                                                                                    | —                                                                          |
| Едкий натр (66% $\text{NaOH}$ ) . . . . .                                 | 15                  | 1700                                  | —                                                                              | —                                                                 | —                                                                                        | —                                                                          |
| Нефтяное масло . . . . .                                                  | 20                  | 890                                   | —                                                                              | 2,43                                                              | 0,104                                                                                    | —                                                                          |
| Ртуть чистая . . . . .                                                    | 0                   | 13600                                 | —                                                                              | 0,138                                                             | 8,14—10,5                                                                                | —                                                                          |
| Спирт бутиловый . . . . .                                                 | 0                   | 810                                   | —                                                                              | —                                                                 | —                                                                                        | 5,19                                                                       |
| Спирт изопропиловый . . . . .                                             | 0                   | —                                     | —                                                                              | —                                                                 | —                                                                                        | 4,60                                                                       |
| Спирт метиловый . . . . .                                                 | 0                   | 810                                   | 122                                                                            | 2,47                                                              | 0,214                                                                                    | 0,817                                                                      |
| Спирт этиловый . . . . .                                                  | 0                   | 806                                   | 110                                                                            | 2,303                                                             | 0,188                                                                                    | 1,78                                                                       |
| Серная кислота . . . . .                                                  | 20                  | 1834                                  | 57                                                                             | 1,386                                                             | —                                                                                        | —                                                                          |
| 7,5%-ная $\text{H}_2\text{SO}_4$ . . . . .                                | 15                  | 1050                                  | —                                                                              | —                                                                 | 0,391                                                                                    | —                                                                          |
| 87%-ная $\text{H}_2\text{SO}_4$ . . . . .                                 | 15                  | 1800                                  | —                                                                              | —                                                                 | 0,372                                                                                    | —                                                                          |
| Сернистая кислота сгущенная . . . . .                                     | —20                 | 1490                                  | —                                                                              | 1,339                                                             | —                                                                                        | —                                                                          |
| Смоляное масло . . . . .                                                  | 15                  | 960                                   | —                                                                              | —                                                                 | —                                                                                        | —                                                                          |
| Соляная кислота . . . . .                                                 | 20                  | —                                     | —                                                                              | 3,098                                                             | —                                                                                        | —                                                                          |
| 10%-ная $\text{HCl}$ . . . . .                                            | 15                  | 1050                                  | —                                                                              | —                                                                 | —                                                                                        | —                                                                          |
| Смола . . . . .                                                           | 80                  | 1200                                  | —                                                                              | —                                                                 | 0,139                                                                                    | —                                                                          |
| Скипидар . . . . .                                                        | 0                   | —                                     | 94                                                                             | 1,716                                                             | 0,127 (15)                                                                               | —                                                                          |
| Уксусная кислота . . . . .                                                | 0                   | 1049                                  | —                                                                              | 2,135                                                             | 0,177                                                                                    | 1,24                                                                       |
| Эфир . . . . .                                                            | 30                  | —                                     | 163                                                                            | 2,261                                                             | 0,139                                                                                    | —                                                                          |

Примечание. В скобках указана температура

Таблица II-2

Физические параметры трансформаторного масла в зависимости от температуры

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\rho, \text{кг/м}^3$ | $c, \text{кДж/}$<br>$(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ | $\lambda, \text{Вт/}$<br>$(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ | $\nu\cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$ | $\eta\cdot 10^4, \text{Н}\cdot\text{с/м}^2$ | $\alpha\cdot 10^4, \text{м}^2/\text{ч}$ | $Pr$ | $\beta\cdot 10^4, 1/^\circ\text{C}$ |
|---------------------|-----------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------|------|-------------------------------------|
| -20                 | 904,6                 | 1,432                                                | 0,1141                                                   | —                                    | —                                           | 3,15                                    | —    | 6,70                                |
| -10                 | 898,6                 | 1,491                                                | 0,1132                                                   | —                                    | —                                           | 3,04                                    | —    | 6,75                                |
| 0,0                 | 892,5                 | 1,549                                                | 0,1124                                                   | 70,5                                 | 629,6                                       | 2,93                                    | 866  | 6,80                                |
| 10                  | 886,4                 | 1,620                                                | 0,1115                                                   | 37,9                                 | 335,4                                       | 2,82                                    | 484  | 6,85                                |
| 20                  | 880,3                 | 1,666                                                | 0,1106                                                   | 22,5                                 | 198,1                                       | 2,72                                    | 298  | 6,90                                |
| 30                  | 874,2                 | 1,729                                                | 0,1098                                                   | 14,7                                 | 128,5                                       | 2,62                                    | 202  | 6,95                                |
| 40                  | 868,2                 | 1,788                                                | 0,1089                                                   | 10,3                                 | 89,3                                        | 2,53                                    | 146  | 7,00                                |
| 50                  | 862,1                 | 1,846                                                | 0,1082                                                   | 7,58                                 | 65,3                                        | 2,45                                    | 111  | 7,05                                |
| 60                  | 856,0                 | 1,905                                                | 0,1072                                                   | 5,78                                 | 49,5                                        | 2,37                                    | 87,8 | 7,10                                |
| 70                  | 850,0                 | 1,964                                                | 0,1064                                                   | 4,54                                 | 38,6                                        | 2,29                                    | 71,3 | 7,10                                |
| 80                  | 843,9                 | 2,026                                                | 0,1056                                                   | 3,66                                 | 30,8                                        | 2,22                                    | 59,3 | 7,20                                |
| 90                  | 837,8                 | 2,085                                                | 0,1047                                                   | 3,03                                 | 25,4                                        | 2,16                                    | 50,5 | 7,25                                |
| 100                 | 831,8                 | 2,144                                                | 0,1039                                                   | 2,56                                 | 21,3                                        | 2,10                                    | 43,9 | 7,30                                |
| 110                 | 825,7                 | 2,202                                                | 0,1030                                                   | 2,20                                 | 18,1                                        | 2,04                                    | 38,8 | 7,35                                |
| 120                 | 819,6                 | 2,261                                                | 0,1022                                                   | 1,92                                 | 15,7                                        | 1,98                                    | 34,9 | 7,40                                |

Таблица II-3

Коэффициент теплопроводности  $\lambda, \text{Вт/}(м\cdot^\circ\text{C})$ , некоторых жидкостей в зависимости от температуры

| Вещество                      | $t, ^\circ\text{C}$ |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                               | 0                   | 25    | 50    | 75    | 100   | 125   | 150   |
| Анилин . . . . .              | 0,186               | 0,181 | 0,177 | 0,172 | 0,168 | 0,162 | 0,159 |
| Ацетон . . . . .              | 0,174               | 0,169 | 0,163 | 0,157 | 0,151 | —     | —     |
| Бензин . . . . .              | 0,145               | —     | 0,110 | —     | —     | —     | —     |
| Бензол . . . . .              | 0,151               | 0,144 | 0,138 | 0,131 | 0,126 | 0,119 | —     |
| Вазелиновое масло . . . . .   | 0,126               | 0,123 | 0,122 | 0,121 | 0,119 | 0,117 | 0,116 |
| Вода . . . . .                | 0,551               | 0,613 | 0,648 | 0,671 | 0,683 | 0,686 | 0,684 |
| Глицерин . . . . .            | 0,277               | 0,279 | 0,283 | 0,286 | 0,288 | 0,292 | 0,295 |
| Касторовое масло . . . . .    | 0,184               | 0,80  | 0,177 | 0,175 | 0,171 | 0,167 | 0,165 |
| Керосин . . . . .             | 0,121               | —     | 0,089 | —     | —     | —     | —     |
| Ксилол . . . . .              | 0,136               | 0,131 | 0,127 | 0,121 | 0,117 | 0,113 | —     |
| Муравьиная кислота . . . . .  | 0,261               | 0,256 | 0,251 | 0,247 | —     | —     | —     |
| Нитробензол . . . . .         | 0,154               | 0,150 | 0,147 | 0,143 | 0,139 | 0,136 | —     |
| Спирт бутиловый . . . . .     | 0,156               | 0,152 | 0,148 | 0,144 | —     | —     | —     |
| Спирт изопропиловый . . . . . | 0,154               | 0,150 | 0,145 | 0,142 | —     | —     | —     |
| Спирт метиловый . . . . .     | 0,214               | 0,211 | 0,207 | 0,205 | —     | —     | —     |
| Спирт этиловый 96% . . . . .  | 0,188               | 0,184 | 0,177 | 0,171 | —     | —     | —     |
| Толуол . . . . .              | 0,142               | 0,136 | 0,129 | 0,123 | 0,119 | 0,122 | —     |
| Уксусная кислота . . . . .    | 0,177               | 0,171 | 0,166 | 0,162 | —     | —     | —     |

Таблица II-4

Коэффициент теплопроводности жидкостей в зависимости от температуры

| Наименование                          | $t, ^\circ\text{C}$ | $\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ |
|---------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------|
| Аммиак                                | 0—100               | 0,539—0,313                                        |
| Водный раствор аммиака 26%-ный        | 20—60               | 0,451—0,501                                        |
| Диэтиленгликоль                       | 0—100               | 0,202—0,214                                        |
| Дихлордифторметан                     | { -7—+15<br>15—82   | 0,098—0,092<br>0,092—0,066                         |
| Дихлорметан                           | -15—+30             | 0,192—0,168                                        |
| Дизельное топливо (летнее)            | 10—130              | 0,131—0,117                                        |
| Натрий                                | 100                 | 84,8                                               |
| Натрий                                | 210                 | 79,6                                               |
| Нефтяной эфир                         | 30—75               | 0,130—0,127                                        |
| Нитробензол                           | 0—125               | 0,154—0,136                                        |
| Октан (n)                             | 0—100               | 0,149—0,137                                        |
| Парадегид                             | 30—100              | 0,145—0,135                                        |
| Парафин ( $\rho=880 \text{ кг/м}^3$ ) | { 0—100<br>200      | 0,126<br>0,124                                     |
| Пентан (n)                            | -200—+100           | 0,169—0,124                                        |
| Серная кислота:                       |                     |                                                    |
| 90%-ная                               | 30                  | 0,363                                              |
| 60%-ная                               | 30                  | 0,433                                              |
| 30%-ная                               | 30                  | 0,530                                              |
| Серный ангидрид                       | -20—+30             | 0,223—0,193                                        |
| Спирт амилловый                       | 0—100               | 0,166—0,154                                        |
| Спирт:                                |                     |                                                    |
| изоамиловый                           | 0—100               | 0,151—0,147                                        |
| этиловый, 100%-ный                    | 0—80                | 0,186—0,175                                        |
| » 97%-ный                             | 0—75                | 0,189—0,172                                        |
| » 80%-ный                             | 0—80                | 0,191—0,319                                        |
| » 60%-ный                             | 0—80                | 0,251—0,381                                        |
| » 40%-ный                             | 0—80                | 0,349—0,483                                        |
| » 20%-ный                             | 0—80                | 0,448—0,579                                        |
| Трихлорэтилен                         | 50                  | 0,138                                              |
| Трихлорэтан $\beta$                   | 50                  | 0,134                                              |
| Хлористый натрий:                     |                     |                                                    |
| 12,5%-ный                             | 30                  | 0,588                                              |
| 25%-ный                               | 30                  | 0,569                                              |
| Хлористый кальций:                    |                     |                                                    |
| 15%-ный                               | 30                  | 0,588                                              |
| 30%-ный рассол                        | 30                  | 0,554                                              |
| Хлористый метил                       | -20—+30             | 0,195—0,154                                        |
| Углекислота:                          |                     |                                                    |
| $\rho=58,9 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$  | 10—20               | 0,101—0,884                                        |
| $\rho=88,2 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$  | 10—30               | 0,107—0,083                                        |

Примечания: 1. Первое значение  $\lambda$  относится к нижнему пределу  $t$ , второе — к верхнему.  
 2. В пределах значений  $t$ , указанных в таблице, допускается линейная интерполяция.  
 3. Составы приведены в % по массе.

Таблица II-5

Теплоемкость некоторых жидких веществ

| Наименование | Теплоемкость, кДж/(кг·°C) | Температура определения теплоемкости, °C | Наименование | Теплоемкость, кДж/(кг·°C) | Температура определения теплоемкости, °C |
|--------------|---------------------------|------------------------------------------|--------------|---------------------------|------------------------------------------|
| Азот         | 1,80                      | От -208 до -196                          | Масло:       |                           |                                          |
| Бензол       | 1,42                      | 19—30                                    | касторовое   | 2,09                      | 20                                       |
| Водород      | 25,1                      | -253                                     | оливковое    | 1,97                      | 7                                        |
| Газолин      | 2,22                      |                                          | МК           | 1,72                      | 20                                       |
| Керосин      | 2,14                      | 18                                       | парафиновое  | 2,18                      | 20—60                                    |
| Кислород     | 1,47                      | От -200 до -183                          | Морская вода | 3,94                      | 17                                       |
|              |                           |                                          | Сероуглерод  | 1,00                      | 18                                       |

Таблица II-6

Теплоемкость  $c_p$  воды при  $p = 0,98 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$

| $t, ^\circ\text{C}$ | $c_p, \frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})}$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $c_p, \frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})}$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $c_p, \frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})}$ |
|---------------------|------------------------------------------------------------|---------------------|------------------------------------------------------------|---------------------|------------------------------------------------------------|
| 0                   | 4,2178                                                     | 35                  | 4,1780                                                     | 70                  | 4,1897                                                     |
| 5                   | 4,2023                                                     | 40                  | 4,1784                                                     | 75                  | 4,1927                                                     |
| 10                  | 4,1922                                                     | 45                  | 4,1793                                                     | 80                  | 4,1964                                                     |
| 15                  | 4,1859                                                     | 50                  | 4,1805                                                     | 85                  | 4,2006                                                     |
| 20                  | 4,1818                                                     | 55                  | 4,1822                                                     | 90                  | 4,2052                                                     |
| 25                  | 4,1797                                                     | 60                  | 4,1843                                                     | 95                  | 4,2102                                                     |
| 30                  | 4,1784                                                     | 65                  | 4,1868                                                     | 100                 | 4,2161                                                     |

Таблица II-7

Истинная теплоемкость  $c$  водных растворов различных концентраций для некоторых веществ

| Температура $t, ^\circ\text{C}$ | $c, \text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ |      |       |      |       |       |
|---------------------------------|--------------------------------------------------|------|-------|------|-------|-------|
| 6<br>20<br>33<br>57             | Раствор NaCl, % (по массе)                       |      |       |      |       |       |
|                                 | 0,8                                              | 3,2  | 7,5   | 24,5 |       |       |
|                                 | —                                                | 4,02 | 3,81  | 3,37 |       |       |
|                                 | 4,14                                             | 4,06 | 3,83  | 3,39 |       |       |
|                                 | —                                                | 4,06 | 3,83  | 3,39 |       |       |
| 20                              | Раствор NaOH, % (по массе)                       |      |       |      |       |       |
|                                 | 1,1                                              | 2,2  | 18,2  | 30,8 | 47,0  | 57,2  |
|                                 | 4,124                                            | 4,06 | 3,496 | 3,35 | 3,282 | 3,274 |
|                                 | Раствор KOH, % (по массе)                        |      |       |      |       |       |
|                                 | 1,6                                              | 4,9  | 13,5  | 23,7 |       |       |
| 20                              | 4,09                                             | 3,89 | 3,408 | 3,14 |       |       |
|                                 | Раствор HCl, % (по массе)                        |      |       |      |       |       |
|                                 | 16,8                                             | 28,9 | 33,6  | 41,4 |       |       |
|                                 | 3,01                                             | 2,55 | 2,43  | 2,3  |       |       |
|                                 | 3,01                                             | 2,53 | 2,41  | —    |       |       |
| 0                               | 3,09                                             | 2,64 | 2,47  | —    |       |       |
| 10                              | 3,14                                             | 2,70 | 2,57  | —    |       |       |
| 20                              | 3,27                                             | 2,81 | 2,67  | 2    |       |       |
| 40                              |                                                  |      |       |      |       |       |
| 60                              |                                                  |      |       |      |       |       |

Таблица II-8

Истинные  $c$  и средние  $c_{\text{ср}}$  теплоемкости  $\text{NH}_4\text{HSO}_4$  и  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , кДж/(кг·°C)

| $t, ^\circ\text{C}$       | $c$        | $c_{\text{ср}}$ | $c$                          | $c_{\text{ср}}$ |
|---------------------------|------------|-----------------|------------------------------|-----------------|
| $\text{NH}_4\text{HSO}_4$ |            |                 | $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ |                 |
| 0                         | 1,168      | 1,168           | 1,365                        | 1,365           |
| 25                        | 1,243      | 1,206           | 1,419                        | 1,394           |
| 50                        | 1,315      | 1,243           | 1,474                        | 1,424           |
| 75                        | 1,390      | 1,277           | 1,524                        | 1,453           |
| 100                       | 1,461      | 1,315           | 1,578                        | 1,482           |
| 125                       | 1,537      | 1,352           | 1,633                        | 1,511           |
| 144                       | 1,591      | 1,382 (тв.)     | —                            | —               |
| 144                       | 1,717      | 2,244 (ж.)      | —                            | —               |
| 150                       | —          | —               | 1,687                        | 1,537           |
| 175                       | 1,800      | 2,160           | 1,738                        | 1,566           |
| 200                       | 1,876      | 2,123           | 1,792                        | 1,595           |
| 225                       | 1,938      | 2,098           | 1,846                        | 1,624           |
| 250                       | 2,005      | 2,085           | 1,897                        | 1,654           |
| 275                       | 2,077      | 2,081           | 1,951                        | 1,683           |
| 300                       | 2,135      | 2,085           | 2,005                        | 1,708           |
| 325                       | 2,211      | 2,089           | 2,059                        | 1,738           |
| 350                       | 2,278      | 2,102           | 2,110                        | 1,767           |
| 359                       | Разложение |                 | —                            | —               |
| 366,6                     | —          | —               | Разложение                   |                 |

Примечания: 1. Уравнения для расчета истинной теплоемкости  $\text{NH}_4\text{HSO}_4$ : в интервале от 0 до 144°C  $c=41,87+0,339 T$  кДж/(кмоль·°C); в интервале от 144 до 350°C  $c=67,24+0,313 T$  кДж/(кмоль·°C).

2. Теплота плавления 14320 кДж/кмоль; тв. — твердое состояние; ж — жидкое состояние.

3. Уравнение для расчета истинной теплоемкости  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  в интервале от 0 до 350°C  $c=180,6+0,28167 T$  кДж/(кмоль·°C).

Таблица II-9

Истинные  $c$  и средние  $c_{\text{ср}}$  теплоемкости  $\text{K}_2\text{SO}_4$ , кДж/(кг·°C)

| $t, ^\circ\text{C}$ | $c$   | $c_{\text{ср}}$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $c$   | $c_{\text{ср}}$ |
|---------------------|-------|-----------------|---------------------|-------|-----------------|
| 0                   | 0,712 | 0,712           | 650                 | 1,089 | 1,063           |
| 50                  | 0,775 | 0,754           | 700                 | 1,114 | 1,068           |
| 100                 | 0,825 | 0,778           | 750                 | 1,139 | 1,076           |
| 150                 | 0,871 | 0,799           | 800                 | 1,164 | 1,080           |
| 200                 | 0,913 | 0,821           | 850                 | 1,185 | 1,084           |
| 250                 | 0,950 | 0,842           | 900                 | 1,209 | 1,089           |
| 300                 | 0,984 | 0,862           | 950                 | 1,235 | 1,097           |
| 350                 | 1,017 | 0,879           | 1000                | 1,260 | 1,101           |
| 400                 | 1,055 | 0,900           | 1069                | 1,289 | 1,109           |
| 450                 | 1,084 | 0,921           | 1069                | —     | 1,306 (ж)       |
| 500                 | 1,118 | 0,942           | 1100                | —     | 1,302           |
| 583                 | 1,172 | 0,976 (α)       | 1200                | 1,139 | 1,294           |
| 583                 | 1,055 | 1,055 (β)       | 1300                | —     | 1,298           |
| 600                 | 1,063 | 1,059           | 1500                | —     | 1,273           |

Примечания: 1. (α) и (β) — фазовые состояния; (ж) — жидкое состояние.

2. Уравнения для расчета истинной теплоемкости: в интервале от 0 до 583°C  $c=114,93+1,0697 T - 1,475 \cdot 10^{-4} T^2$  кДж/(кмоль·°C); в интервале от 583 до 1069°C  $c=112,3+0,094 T$  кДж/(кмоль·°C); в интервале от 1069 до 1500°C  $c=198,2$  кДж/(кмоль·°C).

# Некоторые теплофизические данные для $K_2SO_4$

Уравнения для определения энтальпии:

в интервале от 0 до 583°C

$$i = 114,93 T + 0,05345 T^2 + \frac{1,475 \cdot 10^6}{T} - 40727 \text{ кДж/кмоль};$$

в интервале от 583 до 1069°C

$$i = 112,3 T + 0,4211 T^2 - 19156 \text{ кДж/кмоль};$$

в интервале от 1069 до 1500°C

$$i = 198,2 T - 21600 \text{ кДж/кмоль}.$$

Тепловой эффект  $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения равен 8130 кДж/кмоль.

Теплота плавления 36700 кДж/кмоль.

Таблица II-10

Истинные  $c$  и средние  $c_{\text{ср}}$  теплоемкости солей  $NaCl$ ,  $KCl$ ,  $MgCl_2$  и  $CaSO_4$ , кДж/(кг·°C)

| $t, ^\circ C$ | NaCl  |                 | KCl   |                 | MgCl <sub>2</sub> |                 | CaSO <sub>4</sub> |                 |
|---------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
|               | $c$   | $c_{\text{ср}}$ | $c$   | $c_{\text{ср}}$ | $c$               | $c_{\text{ср}}$ | $c$               | $c_{\text{ср}}$ |
| 0             | 0,854 | 0,854           | 0,674 | 0,674           | 0,791             | 0,791           | 0,691             | 0,691           |
| 50            | 0,871 | 0,862           | 0,687 | 0,682           | 0,799             | 0,795           | —                 | —               |
| 100           | 0,889 | 0,871           | 0,699 | 0,687           | 0,812             | 0,799           | 0,787             | 0,741           |
| 150           | 0,900 | 0,879           | 0,716 | 0,695           | 0,825             | 0,808           | —                 | —               |
| 200           | 0,917 | 0,888           | 0,729 | 0,699           | 0,837             | 0,812           | 0,867             | 0,783           |
| 250           | 0,929 | 0,892           | 0,741 | 0,708           | 0,849             | 0,816           | —                 | —               |
| 300           | 0,946 | 0,900           | 0,754 | 0,716           | 0,858             | 0,825           | 0,942             | 0,825           |
| 350           | 0,959 | 0,909           | 0,766 | 0,720           | 0,871             | 0,829           | —                 | —               |
| 400           | 0,976 | 0,917           | 0,783 | 0,729           | 0,887             | 0,837           | 1,013             | 0,862           |
| 450           | 0,992 | 0,921           | 0,795 | 0,733           | 0,886             | 0,842           | —                 | —               |
| 500           | 1,005 | 0,929           | 0,808 | 0,741           | 0,909             | 0,849           | 1,084             | 0,900           |
| 550           | 1,022 | 0,938           | 0,821 | 0,749           | 0,921             | 0,854           | —                 | —               |
| 600           | 1,034 | 0,946           | 0,833 | 0,754           | 0,929             | 0,856           | 1,151             | 0,938           |
| 650           | 1,051 | 0,955           | 0,849 | 0,762           | 0,942             | 0,867           | —                 | —               |
| 700           | 1,068 | 0,959           | 0,862 | 0,766           | 0,955             | 0,871           | 1,223             | 0,971           |
| 750           | 1,080 | 0,967           | 0,875 | 0,775           | —                 | —               | —                 | —               |
| 800           | 1,097 | 0,976           | —     | —               | —                 | —               | 1,289             | 1,009           |
| 900           | —     | —               | —     | —               | —                 | —               | 1,361             | 1,043           |
| 1000          | —     | —               | —     | —               | —                 | —               | 1,428             | 1,080           |
| 1100          | —     | —               | —     | —               | —                 | —               | 1,495             | 1,114           |

Примечание. Уравнения для расчета теплоемкостей:

для  $NaCl$

$$c = 0,854 + 3,015 \cdot 10^{-4} t \text{ кДж/(кг·°C)},$$

$$c_{\text{ср}} = 0,854 + 1,508 \cdot 10^{-4} t \text{ кДж/(кг·°C)};$$

для  $KCl$

$$c = 0,674 + 26,8 \cdot 10^{-5} t \text{ кДж/(кг·°C)},$$

$$c_{\text{ср}} = 0,674 + 13,4 \cdot 10^{-5} t \text{ кДж/(кг·°C)};$$

для  $MgCl_2$

$$c = 0,79 + 2,34 \cdot 10^{-4} t \text{ кДж/(кг·°C)};$$

$$c_{\text{ср}} = 0,79 + 1,17 \cdot 10^{-4} t \text{ кДж/(кг·°C)};$$

для  $CaSO_4$

$$c = 77,57 + 91,95 \cdot 10^{-3} T - 6,568 \cdot 10^{-6} T^2 \text{ кДж/(кг·°C)}.$$

Точность  $\pm 5\%$  при 0—1100°C.

Таблица II-11

Температура и теплота плавления солей  $NaCl$ ,  $KCl$ ,  $MgCl_2$

| Соль              | $t_{\text{пл}}, ^\circ C$ | $Q_{\text{пл}}, \text{кДж/кмоль}$ |
|-------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| NaCl              | 800                       | 28470 $\pm$ 400                   |
| KCl               | 790                       | 26790                             |
| MgCl <sub>2</sub> | 712                       | 40440 $\pm$ 1200                  |

Т а б л и ц а II-12

Теплофизические характеристики селитряной смеси\*

| $t, ^\circ\text{C}$ | Плотность $\rho$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> | Коэффициент<br>теплопроводности<br>$\lambda$ , Вт/(м·°C) | Коэффициент<br>вязкости $\eta \cdot 10^4$ ,<br>Н·с/м <sup>2</sup> | Удельная<br>энthalпия $i$ ,<br>кДж/кг | Критерий<br>Прандтля |
|---------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| 150                 | 1976                                    | 0,441                                                    | 177,7                                                             | 337,9                                 | 57,4                 |
| 160                 | 1967                                    | 0,439                                                    | 146,6                                                             | 352,1                                 | 47,5                 |
| 170                 | 1959                                    | 0,438                                                    | 122,9                                                             | 366,3                                 | 39,9                 |
| 180                 | 1951                                    | 0,437                                                    | 104,7                                                             | 380,6                                 | 34,1                 |
| 190                 | 1943                                    | 0,436                                                    | 90,3                                                              | 394,8                                 | 29,5                 |
| 200                 | 1934                                    | 0,435                                                    | 78,9                                                              | 409,1                                 | 25,8                 |
| 210                 | 1926                                    | 0,434                                                    | 69,5                                                              | 423,3                                 | 22,8                 |
| 220                 | 1919                                    | 0,433                                                    | 61,9                                                              | 437,5                                 | 20,4                 |
| 230                 | 1911                                    | 0,430                                                    | 55,6                                                              | 451,8                                 | 18,4                 |
| 240                 | 1903                                    | 0,428                                                    | 50,2                                                              | 465,9                                 | 16,7                 |
| 250                 | 1895                                    | 0,426                                                    | 45,7                                                              | 480,2                                 | 15,3                 |
| 260                 | 1887                                    | 0,419                                                    | 41,9                                                              | 494,5                                 | 14,2                 |
| 270                 | 1879                                    | 0,413                                                    | 38,5                                                              | 508,7                                 | 13,3                 |
| 280                 | 1871                                    | 0,407                                                    | 35,6                                                              | 522,9                                 | 12,4                 |
| 290                 | 1864                                    | 0,400                                                    | 33,1                                                              | 537,2                                 | 11,8                 |
| 300                 | 1856                                    | 0,393                                                    | 30,9                                                              | 551,4                                 | 11,2                 |
| 310                 | 1849                                    | 0,387                                                    | 29,0                                                              | 565,6                                 | 10,7                 |
| 320                 | 1841                                    | 0,381                                                    | 27,2                                                              | 579,9                                 | 10,1                 |
| 330                 | 1834                                    | 0,375                                                    | 25,7                                                              | 594,1                                 | 9,76                 |
| 340                 | 1826                                    | 0,369                                                    | 24,3                                                              | 608,3                                 | 9,39                 |
| 350                 | 1819                                    | 0,362                                                    | 23,1                                                              | 622,6                                 | 9,11                 |
| 360                 | 1812                                    | 0,356                                                    | 21,9                                                              | 636,8                                 | 8,74                 |
| 370                 | 1804                                    | 0,349                                                    | 20,9                                                              | 651,1                                 | 8,52                 |
| 380                 | 1797                                    | 0,343                                                    | 20,0                                                              | 665,3                                 | 8,30                 |
| 390                 | 1790                                    | 0,336                                                    | 19,1                                                              | 679,5                                 | 8,10                 |
| 400                 | 1783                                    | 0,330                                                    | 18,3                                                              | 693,8                                 | 7,91                 |
| 410                 | 1776                                    | 0,323                                                    | 17,6                                                              | 707,9                                 | 7,76                 |
| 420                 | 1769                                    | 0,317                                                    | 16,97                                                             | 722,2                                 | 7,60                 |
| 430                 | 1762                                    | 0,311                                                    | 16,36                                                             | 736,5                                 | 7,50                 |
| 440                 | 1744                                    | 0,305                                                    | 15,79                                                             | 750,7                                 | 7,37                 |
| 450                 | 1748                                    | 0,298                                                    | 15,26                                                             | 764,9                                 | 7,29                 |
| 460                 | 1741                                    | 0,292                                                    | 14,78                                                             | 779,2                                 | 7,20                 |
| 470                 | 1734                                    | 0,285                                                    | 14,33                                                             | 793,4                                 | 7,16                 |
| 480                 | 1728                                    | 0,279                                                    | 13,91                                                             | 807,6                                 | 7,09                 |
| 490                 | 1721                                    | 0,272                                                    | 13,50                                                             | 821,9                                 | 7,06                 |
| 500                 | 1715                                    | 0,266                                                    | 13,13                                                             | 836,1                                 | 7,02                 |
| 510                 | 1708                                    | 0,259                                                    | 12,78                                                             | 850,3                                 | 7,01                 |
| 520                 | 1701                                    | 0,254                                                    | 12,46                                                             | 864,6                                 | 7,00                 |
| 530                 | 1695                                    | 0,248                                                    | 12,15                                                             | 878,8                                 | 7,00                 |
| 540                 | 1688                                    | 0,241                                                    | 11,87                                                             | 892,6                                 | 7,00                 |
| 550                 | 1681                                    | 0,235                                                    | 11,58                                                             | 906,9                                 | 7,00                 |

\* Состав смеси: 40%  $\text{NaNO}_3$ ; 53%  $\text{KNO}_3$ ; 7%  $\text{NaNO}_2$ ;  $t_{\text{пл}} = 148^\circ\text{C}$ .

Т а б л и ц а II-13

## Зависимость физических свойств жидких металлов и сплавов от температуры

| Упругость паров     |                      | Плотность           |                       | Теплоемкость        |                                       | Вязкость                              |                                           | Теплопроводность          |                                           | Удельное электрическое сопротивление |                                     | Поверхностное натяжение |                          | Изменение объема при плавлении по отношению к объему в твердом состоянии, % |   |   |   |   |
|---------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|---|---|---|---|
| $t, ^\circ\text{C}$ | $\kappa\text{Н/м}^2$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\rho, \text{г/см}^3$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $c, \text{кДж/кг}\cdot^\circ\text{C}$ | $t, ^\circ\text{C}$                   | $\eta, \text{мН}\cdot\text{с/м}^2$        | $t, ^\circ\text{C}$       | $\lambda, \text{Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$ | $t, ^\circ\text{C}$                  | $\rho_z, \text{мКОм}\cdot\text{см}$ | $t, ^\circ\text{C}$     | $\sigma, \text{мДж/м}^2$ |                                                                             |   |   |   |   |
| Алюминий            |                      |                     |                       |                     |                                       |                                       |                                           |                           |                                           |                                      |                                     |                         |                          |                                                                             |   |   |   |   |
| 1537                | 0,133                | 660                 | 2,380                 | 660                 | 1,081                                 | {<br>700<br>800<br>—                  | {<br>—<br>2,90<br>1,40<br>—               | {<br>—<br>700<br>790<br>— | {<br>—<br>104<br>122<br>—                 | 657                                  | 19,6                                | 750                     | 520                      | 6,6                                                                         |   |   |   |   |
| 1770                | 1,333                | 700                 | 2,369                 | —                   |                                       |                                       |                                           |                           |                                           | 670                                  | 20,5                                | —                       | —                        | —                                                                           | — | — | — | — |
| 2081                | 13,33                | 900                 | 2,315                 | —                   |                                       |                                       |                                           |                           |                                           | 735                                  | 21,3                                | —                       | —                        | —                                                                           | — | — | — | — |
| —                   | 26,66                | 1100                | 2,261                 | —                   |                                       |                                       |                                           |                           |                                           | 807                                  | 22,4                                | —                       | —                        | —                                                                           | — | — | — | — |
| 2360                | 53,32                | —                   | —                     | 1000                |                                       | —                                     | —                                         | —                         | —                                         | 870                                  | 23,2                                | —                       | —                        | —                                                                           |   |   |   |   |
| Висмут              |                      |                     |                       |                     |                                       |                                       |                                           |                           |                                           |                                      |                                     |                         |                          |                                                                             |   |   |   |   |
| 917                 | 0,133                | 300                 | 10,03                 | 271                 | 0,142                                 | 304                                   | 1,66                                      | 300                       | 17,1                                      | 300                                  | 128,9                               | 300                     | 376                      | —3,32                                                                       |   |   |   |   |
| 1067                | 1,333                | 400                 | 9,91                  | 400                 | 0,148                                 | 451                                   | 1,28                                      | 400                       | 15,5                                      | 400                                  | 134,2                               | 350                     | 373                      | —                                                                           |   |   |   |   |
| 1257                | 13,33                | 600                 | 9,66                  | 600                 | 0,158                                 | 600                                   | 0,99                                      | 500                       | 15,5                                      | 600                                  | 145,25                              | 400                     | 370                      | —                                                                           |   |   |   |   |
| 1325                | 26,66                | 802                 | 9,40                  | 800                 | 0,166                                 | —                                     | —                                         | 600                       | 15,5                                      | 750                                  | 153,53                              | 450                     | 367                      | —                                                                           |   |   |   |   |
| 1400                | 53,32                | 962                 | 9,20                  | 1000                | 0,175                                 | —                                     | —                                         | 700                       | 15,5                                      | —                                    | —                                   | 500                     | 363                      | —3,1                                                                        |   |   |   |   |
| Галлий              |                      |                     |                       |                     |                                       |                                       |                                           |                           |                                           |                                      |                                     |                         |                          |                                                                             |   |   |   |   |
| 1315                | 0,133                | 32,38               | 6,093                 | 12,5                | 0,343                                 | {<br>52,9<br>301<br>402<br>500<br>806 | {<br>1,89<br>1,03<br>0,88<br>0,81<br>0,65 | $t_{\text{пл}}$           | {<br>29,4<br>—<br>—<br>—<br>37,6          | 29,75                                | 25,9                                | {<br>30<br>—<br>—<br>40 | 735                      | —                                                                           |   |   |   |   |
| 1497                | 1,333                | 301                 | 5,905                 | —                   |                                       |                                       |                                           |                           |                                           | 30,3                                 | 27,2                                |                         |                          |                                                                             | — | — | — | — |
| 1726                | 13,33                | 600                 | 5,720                 | —                   |                                       |                                       |                                           |                           |                                           | 46,1                                 | 28,4                                |                         |                          |                                                                             | — | — | — | — |
| 1807                | 26,66                | 806                 | 5,604                 | —                   |                                       |                                       |                                           |                           |                                           | —                                    | —                                   |                         |                          |                                                                             | — | — | — | — |
| 1895                | 53,32                | 1100                | 5,445                 | 200                 |                                       | 806                                   | 0,65                                      | —                         | —                                         | —                                    | —                                   | —                       | —                        | —                                                                           |   |   |   |   |
| Золото              |                      |                     |                       |                     |                                       |                                       |                                           |                           |                                           |                                      |                                     |                         |                          |                                                                             |   |   |   |   |
| 1869                | 0,133                | 1100                | 17,24                 | 1063                | 0,148                                 | —                                     | —                                         | —                         | —                                         | 1100                                 | 31,4                                | 1120                    | 1128                     | 5,195                                                                       |   |   |   |   |
| 2154                | 1,333                | 1200                | 17,12                 | —                   |                                       |                                       |                                           |                           |                                           | 1200                                 | 32,76                               | —                       | —                        | —                                                                           | — | — | — | — |
| 2521                | 13,33                | 1300                | 17,00                 | —                   |                                       |                                       |                                           |                           |                                           | 1300                                 | 34,17                               | —                       | —                        | —                                                                           | — | — | — | — |
| 2657                | 26,66                | —                   | —                     | —                   |                                       |                                       |                                           |                           |                                           | 1400                                 | 35,58                               | —                       | —                        | —                                                                           | — | — | — | — |
| 2808                | 53,52                | —                   | —                     | 1300                |                                       | —                                     | —                                         | —                         | —                                         | 1500                                 | 37,00                               | —                       | —                        | —                                                                           |   |   |   |   |

Продолжение табл. III-13

| продолжение табл. III-1 |       |           |          |              |                |          |            |                  |              |                                           |             |                              |           |                                                                                                       |
|-------------------------|-------|-----------|----------|--------------|----------------|----------|------------|------------------|--------------|-------------------------------------------|-------------|------------------------------|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Упругость паров         |       | Плотность |          | Теплоемкость |                | Вязкость |            | Теплопроводность |              | Удельное электри-<br>ческое сопротивление |             | Поверхностное натя-<br>жение |           | Изменение<br>объема при<br>плавлении<br>по отно-<br>шению<br>к объему<br>в твердом<br>состоянии,<br>% |
| t, °C                   | кН/м² | t, °C     | ρ, г/см³ | t, °C        | c, кДж/(кг·°C) | t, °C    | η, мН·с/м² | t, °C            | λ, Вт/(м·°C) | t, °C                                     | ρ₂, мКОМ·см | t, °C                        | σ, мДж/м² |                                                                                                       |
|                         |       |           |          |              |                |          |            |                  |              |                                           |             |                              |           |                                                                                                       |
| Индий                   |       |           |          |              |                |          |            |                  |              |                                           |             |                              |           |                                                                                                       |
| 1249                    | 0,133 | 164       | 7,026    | 156,4        | 0,274          | —        | —          | —                | 37,6         | 154,0                                     | 29,10       | 170                          | —         | 2,5                                                                                                   |
| 1466                    | 1,333 | 194       | 7,001    | —            | —              | —        | —          | t <sub>пл</sub>  | —            | 181,5                                     | 30,11       | —                            | —         | —                                                                                                     |
| 1766                    | 13,33 | 228       | 6,974    | —            | —              | —        | —          | —                | —            | 222,0                                     | 31,87       | —                            | —         | —                                                                                                     |
| 1863                    | 26,66 | 271       | 6,939    | —            | —              | —        | —          | —                | —            | 280,2                                     | 34,84       | —                            | —         | —                                                                                                     |
| 1982                    | 53,32 | 300       | 6,916    | —            | —              | —        | —          | —                | 50,2         | —                                         | —           | 250                          | —         | —                                                                                                     |
| Кадмий                  |       |           |          |              |                |          |            |                  |              |                                           |             |                              |           |                                                                                                       |
| 394                     | 0,133 | 330       | 0,01     | —            | —              | 350      | 2,37       | 355              | 44,5         | 325                                       | 33,7        | 330                          | 564       | 4,74                                                                                                  |
| 484                     | 1,333 | 350       | 7,99     | —            | —              | 400      | 2,16       | 358              | 44,0         | 400                                       | 33,7        | 370                          | 608       | —                                                                                                     |
| 611                     | 13,33 | 400       | 7,93     | 321          | 0,265          | 500      | 1,84       | 380              | 44,0         | 500                                       | 34,12       | 420                          | 598       | —                                                                                                     |
| 658                     | 26,66 | 500       | 7,82     | —            | —              | 600      | 1,54       | 435              | 50,0         | 600                                       | 34,82       | 450                          | 611       | —                                                                                                     |
| 711                     | 53,32 | 600       | 7,72     | 700          | 0,267          | —        | —          | —                | —            | 700                                       | 35,78       | 500                          | 600       | —                                                                                                     |
| Калий                   |       |           |          |              |                |          |            |                  |              |                                           |             |                              |           |                                                                                                       |
| 342                     | 0,133 | 100       | 0,819    | 75           | 0,817          | 69,6     | 0,515      | 200              | 45,0         | 64                                        | 13,16       | 100                          | —         | —                                                                                                     |
| 443                     | 1,333 | 250       | 0,783    | 200          | 0,789          | 167,4    | 0,330      | 300              | 42,5         | 150                                       | 18,70       | —                            | —         | —                                                                                                     |
| 581                     | 13,33 | 400       | 0,747    | 400          | 0,763          | 250      | 0,259      | 400              | 40,0         | 250                                       | 25,00       | —                            | —         | 2,41                                                                                                  |
| 635                     | 26,66 | 550       | 0,711    | 600          | 0,763          | 400      | 0,191      | 500              | 37,6         | 300                                       | 28,2        | —                            | —         | —                                                                                                     |
| 696                     | 53,32 | 700       | 0,676    | 800          | 0,788          | 700      | 0,136      | 600              | 35,5         | 350                                       | 31,4        | 150                          | —         | —                                                                                                     |
| Литий                   |       |           |          |              |                |          |            |                  |              |                                           |             |                              |           |                                                                                                       |
| 745                     | 0,133 | 200       | 0,507    | 200          | 4,187          | 183,4    | 0,593      | 218              | —            | 230                                       | 45,27       | —                            | —         | 1,5                                                                                                   |
| 890                     | 1,333 | 400       | 0,490    | 600          | 4,187          | 193,2    | 0,574      | —                | —            | —                                         | —           | —                            | —         | —                                                                                                     |
| 1084                    | 13,33 | 600       | 0,474    | 1000         | 4,187          | 208,1    | 0,554      | —                | 37,7         | —                                         | —           | —                            | —         | —                                                                                                     |
| 1156                    | 26,66 | 800       | 0,457    | —            | —              | 250,8    | 0,493      | —                | —            | —                                         | —           | —                            | —         | —                                                                                                     |
| 1236                    | 53,32 | 1000      | 0,441    | —            | —              | 285,5    | 0,456      | 233              | —            | —                                         | —           | —                            | —         | —                                                                                                     |

Продолжение табл. III-13

| Упругость паров     |                      | Плотность           |                       | Теплоемкость        |                                                      | Вязкость            |                                    | Теплопроводность    |                                                          | Удельное электри-<br>ческое сопротивление |                             | Поверхностное<br>натяжение |                          | Изменение<br>объема<br>при плав-<br>лении по<br>отношению<br>к объему<br>в твердом<br>состоянии,<br>% |
|---------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|------------------------------------------------------|---------------------|------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $t, ^\circ\text{C}$ | $\kappa\text{Н/м}^2$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\rho, \text{г/см}^3$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $c, \text{кДж/}$<br>$(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\eta, \text{мН}\cdot\text{с/м}^2$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\lambda, \text{Вт/}$<br>$(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ | $t, ^\circ\text{C}$                       | $\rho_{\text{э}},$<br>мОм·с | $t, ^\circ\text{C}$        | $\sigma, \text{мДж/м}^2$ |                                                                                                       |
| Магний              |                      |                     |                       |                     |                                                      |                     |                                    |                     |                                                          |                                           |                             |                            |                          |                                                                                                       |
| 621                 | 0,133                | 651                 | 1,572                 | 651                 | 1,325                                                | —                   | —                                  | —                   | —                                                        | —                                         | —                           | —                          | —                        | —                                                                                                     |
| 702                 | 1,333                | 678                 | 1,55                  | 727                 | 1,345                                                | —                   | —                                  | —                   | —                                                        | —                                         | —                           | —                          | —                        | —                                                                                                     |
| 909                 | 13,33                | 700                 | 1,536                 | 927                 | 1,390                                                | —                   | —                                  | —                   | —                                                        | —                                         | —                           | 681                        | 563                      | 4,2                                                                                                   |
| 967                 | 26,66                | 720                 | 1,51                  | 1027                | 1,410                                                | —                   | —                                  | —                   | —                                                        | —                                         | —                           | 894                        | 502                      | —                                                                                                     |
| 1034                | 53,32                | 750                 | 1,47                  | 1120                | 1,430                                                | —                   | —                                  | —                   | —                                                        | —                                         | —                           | —                          | —                        | —                                                                                                     |
| Натрий              |                      |                     |                       |                     |                                                      |                     |                                    |                     |                                                          |                                           |                             |                            |                          |                                                                                                       |
| 440                 | 0,133                | 100                 | 0,928                 | 100                 | 1,385                                                | 103,7               | 0,685                              | 100                 | 86,3                                                     | 100                                       | 9,65                        | 100                        | 206,4                    | 2,5                                                                                                   |
| 548                 | 1,333                | 250                 | 0,891                 | 200                 | 1,339                                                | 167,6               | 0,504                              | 200                 | 82,0                                                     | 200                                       | 13,18                       | 250                        | 199,5                    | —                                                                                                     |
| 696                 | 13,33                | 400                 | 0,854                 | 400                 | 1,281                                                | 250                 | 0,381                              | 300                 | 76,0                                                     | 250                                       | 14,90                       | —                          | —                        | —                                                                                                     |
| 752                 | 26,66                | 550                 | 0,817                 | 600                 | 1,254                                                | 400                 | 0,270                              | 400                 | 71,7                                                     | 300                                       | 16,70                       | —                          | —                        | —                                                                                                     |
| 815                 | 53,32                | 700                 | 0,780                 | 800                 | 1,263                                                | 700                 | 0,182                              | 500                 | 67,1                                                     | 350                                       | 18,44                       | —                          | —                        | —                                                                                                     |
| Олово               |                      |                     |                       |                     |                                                      |                     |                                    |                     |                                                          |                                           |                             |                            |                          |                                                                                                       |
| 1492                | 0,133                | 409                 | 6,834                 | 250                 | 0,243                                                | 240                 | 0,192                              | 240                 | 33,6                                                     | 231,9                                     | 47,6                        | 300                        | 526                      | 2,6                                                                                                   |
| 1703                | 1,333                | 523                 | 6,761                 | —                   | —                                                    | 300                 | 0,166                              | 292                 | 34,0                                                     | 400                                       | 51,4                        | 350                        | 522                      | —                                                                                                     |
| 1968                | 13,33                | 574                 | 6,729                 | —                   | —                                                    | 400                 | 0,138                              | 417                 | 33,1                                                     | 600                                       | 56,8                        | 400                        | 518                      | —                                                                                                     |
| 2063                | 26,66                | 648                 | 6,721                 | —                   | —                                                    | 500                 | 0,118                              | 498                 | 32,8                                                     | 800                                       | 62,7                        | 450                        | 514                      | —                                                                                                     |
| 2169                | 53,32                | 704                 | 6,640                 | 1100                | 0,316                                                | 600                 | 0,105                              | —                   | —                                                        | 1000                                      | 68,6                        | 500                        | 510                      | —                                                                                                     |
| Ртуть               |                      |                     |                       |                     |                                                      |                     |                                    |                     |                                                          |                                           |                             |                            |                          |                                                                                                       |
| 126,2               | 0,133                | —20                 | 13,645                | 0                   | 0,1388                                               | —20                 | 1,86                               | 0                   | 8,22                                                     | 50                                        | 98,4                        | 20                         | 465                      | 3,6                                                                                                   |
| 184,0               | 1,333                | 20                  | 13,546                | 100                 | 0,1373                                               | 0                   | 1,68                               | 60                  | 9,70                                                     | 100                                       | 103,2                       | 112                        | 454                      | —                                                                                                     |
| 261,7               | 13,33                | 100                 | 13,352                | 200                 | 0,1355                                               | 20                  | 1,55                               | 120                 | 11,0                                                     | 200                                       | 114,2                       | 200                        | 436                      | —                                                                                                     |
| 290,7               | 26,66                | 200                 | 13,115                | 300                 | 0,1351                                               | 100                 | 1,21                               | 160                 | 11,6                                                     | 300                                       | 127,5                       | 300                        | 405                      | —                                                                                                     |
| 323,0               | 53,32                | 300                 | 12,881                | 450                 | 0,1362                                               | 200                 | 1,01                               | 220                 | 12,7                                                     | 350                                       | 135,5                       | 394                        | 354                      | —                                                                                                     |
| Рубидий             |                      |                     |                       |                     |                                                      |                     |                                    |                     |                                                          |                                           |                             |                            |                          |                                                                                                       |
| 294                 | 0,133                | 39,0                | 1,475                 | 39                  | —                                                    | 38                  | 0,673                              | $t_{\text{пл}}$     | 29,4                                                     | 50                                        | 23,15                       | —                          | —                        | 2,5                                                                                                   |
| 387                 | 1,333                | —                   | —                     | —                   | 0,382                                                | 50                  | 0,625                              | $t_{\text{пл}}$     | —                                                        | 75                                        | 25,32                       | —                          | —                        | —                                                                                                     |
| 519                 | 13,33                | —                   | —                     | —                   | —                                                    | 99,7                | 0,484                              | $t_{\text{пл}}$     | —                                                        | 100                                       | 27,47                       | —                          | —                        | —                                                                                                     |
| 569                 | 26,66                | —                   | —                     | —                   | —                                                    | 140,5               | 0,414                              | $t_{\text{пл}}$     | —                                                        | —                                         | —                           | —                          | —                        | —                                                                                                     |
| 628                 | 53,32                | —                   | —                     | 126                 | —                                                    | 220,1               | 0,324                              | 50                  | 32,6                                                     | —                                         | —                           | —                          | —                        | —                                                                                                     |

Продолжение табл. II-13

| Упругость паров |       | Плотность |          | Теплоемкость |                    | Вязкость |            | Теплопроводность |              | Удельное электри-<br>ческое сопротивление |        | Поверхностное<br>натяжение  |       | Изменение<br>объема<br>при пла-<br>влении по<br>отношению<br>к объему<br>в твердом<br>состоянии,<br>% |              |
|-----------------|-------|-----------|----------|--------------|--------------------|----------|------------|------------------|--------------|-------------------------------------------|--------|-----------------------------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| t, °C           | кН/м² | t, °C     | ρ, г/см³ | t, °C        | c, кДж/<br>(кг·°C) | t, °C    | η, мН·с/м² | t, °C            | λ, Вт/(м·°C) | t, °C                                     |        | ρ <sub>э</sub> ,<br>мКОМ·см | t, °C |                                                                                                       | σ,<br>мДж/м² |
|                 |       |           |          |              |                    |          |            |                  |              |                                           |        |                             |       |                                                                                                       |              |
| Свинец          |       |           |          |              |                    |          |            |                  |              |                                           |        |                             |       |                                                                                                       |              |
| 987             | 0,133 | 400       | 10,51    | 327          | 0,163              | 441      | 2,11       | 390              | 16,3         | 327                                       | 94,6   | 550                         | 442   | 3,6                                                                                                   |              |
| 1167            | 1,333 | 500       | 10,39    | 400          | 0,155              | 456      | 2,06       | 400              | 15,9         | 400                                       | 98,0   | 400                         | 438   | —                                                                                                     |              |
| 1417            | 13,33 | 600       | 10,27    | 500          | 0,155              | 551      | 1,70       | 500              | 15,5         | 600                                       | 107,2  | 450                         | 438   | —                                                                                                     |              |
| 1508            | 26,66 | 800       | 10,04    | —            | —                  | 103      | 1,37       | 600              | 15,0         | 800                                       | 116,4  | 500                         | 431   | —                                                                                                     |              |
| 1611            | 53,32 | 1000      | 9,81     | —            | —                  | 844      | 1,19       | 700              | 15,0         | 1000                                      | 125,7  | —                           | —     | —                                                                                                     |              |
| Серебро         |       |           |          |              |                    |          |            |                  |              |                                           |        |                             |       |                                                                                                       |              |
| 1357            | 0,133 | 960,5     | 9,3      | 960,5        | —                  | 1200     | 0,294      | —                | —            | 1000                                      | 17,0   | 995                         | 923   | 4,99                                                                                                  |              |
| 1575            | 1,333 | 1000      | 9,26     | —            | —                  | —        | —          | —                | —            | 1100                                      | 18,2   | —                           | —     | —                                                                                                     |              |
| 1865            | 13,33 | 1092      | 9,20     | —            | 0,290              | —        | —          | —                | —            | 1200                                      | 19,4   | —                           | —     | —                                                                                                     |              |
| 1971            | 26,66 | 1195      | 9,10     | —            | —                  | —        | —          | —                | —            | 1300                                      | 20,5   | —                           | —     | —                                                                                                     |              |
| 2090            | 53,32 | 1300      | 9,00     | 1300         | —                  | —        | —          | —                | —            | 1340                                      | 21,0   | —                           | —     | —                                                                                                     |              |
| Сурьма          |       |           |          |              |                    |          |            |                  |              |                                           |        |                             |       |                                                                                                       |              |
| 886             | 0,133 | 640       | 6,49     | 650          | —                  | 702      | 1,30       | 630              | 21,8         | 627                                       | 117,00 | 635                         | 383   | 0,94                                                                                                  |              |
| 1033            | 1,333 | 700       | 6,45     | —            | —                  | 801      | 1,11       | —                | —            | 700                                       | 117,65 | 676                         | 384   | —                                                                                                     |              |
| 1223            | 13,33 | 800       | 6,38     | —            | 0,275              | 900      | 0,99       | —                | —            | 800                                       | 120,31 | 725                         | 383   | —                                                                                                     |              |
| 1288            | 26,66 | 970       | 6,29     | —            | —                  | 1002     | 0,90       | 730              | 21,8         | 850                                       | 123,54 | 800                         | 380   | —                                                                                                     |              |
| 1364            | 53,32 | —         | —        | 950          | —                  | —        | —          | —                | —            | 900                                       | 131,00 | —                           | —     | —                                                                                                     |              |
| Таллий          |       |           |          |              |                    |          |            |                  |              |                                           |        |                             |       |                                                                                                       |              |
| 825             | 0,133 | 306,5     | 11,289   | 303          | —                  | —        | —          | 350              | 24,7         | 303                                       | 74,0   | 327                         | 401   | 3,2                                                                                                   |              |
| 983             | 1,333 | 326,7     | 11,254   | —            | —                  | —        | —          | —                | —            | —                                         | —      | —                           | —     | —                                                                                                     |              |
| 1196            | 13,33 | 3300      | 11,250   | —            | 0,1537             | —        | —          | —                | —            | —                                         | —      | —                           | —     | —                                                                                                     |              |
| 1274            | 26,66 | 333,5     | 11,254   | —            | —                  | —        | —          | —                | —            | —                                         | —      | —                           | —     | —                                                                                                     |              |
| 1364            | 53,32 | —         | —        | 500          | —                  | —        | —          | —                | —            | —                                         | —      | —                           | —     | —                                                                                                     |              |
| Цезий           |       |           |          |              |                    |          |            |                  |              |                                           |        |                             |       |                                                                                                       |              |
| 278             | 0,133 | 28        | 1,84     | 28,5         | 0,251              | 43,4     | 0,63       | t <sub>пл</sub>  | 18,4         | 30                                        | 36,6   | —                           | —     | 2,6                                                                                                   |              |
| 387             | 1,333 | —         | —        | —            | —                  | 99,6     | 0,475      | —                | —            | 37                                        | 37,0   | —                           | —     | —                                                                                                     |              |
| 515             | 13,33 | —         | —        | —            | —                  | 140,5    | 0,405      | —                | —            | —                                         | —      | —                           | —     | —                                                                                                     |              |
| 570             | 26,66 | —         | —        | —            | —                  | 168,0    | 0,385      | —                | —            | —                                         | —      | —                           | —     | —                                                                                                     |              |
| 635             | 53,32 | —         | —        | —            | —                  | 210,9    | 0,344      | —                | —            | —                                         | —      | —                           | —     | —                                                                                                     |              |

| Упругость паров                                                          |                             | Плотность           |                              | Теплоемкость        |                                                | Вязкость            |                                           | Теплопроводность    |                                                    | Удельное электрическое сопротивление |                                              | Поверхностное натяжение |                                 | Изменение объема при плавлении по отношению к объему в твердом состоянии, % |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------|------------------------------|---------------------|------------------------------------------------|---------------------|-------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| $t, ^\circ\text{C}$                                                      | $\kappa\text{H}/\text{м}^2$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\rho, \text{г}/\text{см}^3$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $c, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\eta, \text{мН}\cdot\text{с}/\text{м}^2$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ | $t, ^\circ\text{C}$                  | $\rho_{\text{э}}, \text{мКОм}\cdot\text{см}$ | $t, ^\circ\text{C}$     | $\sigma, \text{мДж}/\text{м}^2$ |                                                                             |
| Цинк                                                                     |                             |                     |                              |                     |                                                |                     |                                           |                     |                                                    |                                      |                                              |                         |                                 |                                                                             |
| 487                                                                      | 0,133                       | 419,5               | 6,92                         | 419,5               | 0,501                                          | 450                 | 0,317                                     | 500                 | 58,0                                               | 419,5                                | 35,3                                         | 510                     | 785                             | 6,9                                                                         |
| 593                                                                      | 1,333                       | 600                 | 6,81                         | 600                 | 0,490                                          | 500                 | 0,278                                     | 600                 | 57,2                                               | 500                                  | 35,4                                         | 550                     | 778                             | —                                                                           |
| 736                                                                      | 13,33                       | 800                 | 6,57                         | 800                 | 0,450                                          | 600                 | 0,224                                     | 700                 | 56,9                                               | 600                                  | 35,0                                         | 600                     | 768                             | —                                                                           |
| 788                                                                      | 26,66                       | —                   | —                            | 900                 | 0,437                                          | 700                 | 0,188                                     | —                   | —                                                  | 700                                  | 35,65                                        | 640                     | 761                             | —                                                                           |
| Сплав натрия с калием, близкий к эвтектике, 22% Na и 78% K               |                             |                     |                              |                     |                                                |                     |                                           |                     |                                                    |                                      |                                              |                         |                                 |                                                                             |
| 382                                                                      | 0,133                       | 100                 | 0,886                        | 100                 | 1,123                                          | 103,7               | 0,546                                     | 100                 | 25,9                                               | 50                                   | 33,0                                         | $t_{\text{пл}}$         | 110—100                         | —                                                                           |
| 490                                                                      | 1,333                       | 250                 | 0,850                        | 300                 | 1,068                                          | 167,5               | 0,411                                     | 200                 | 26,6                                               | 100                                  | 35,5                                         | —                       | —                               | —                                                                           |
| 638                                                                      | 13,33                       | 400                 | 0,814                        | 500                 | 1,041                                          | 250                 | 0,316                                     | 300                 | 27,2                                               | 150                                  | 38,0                                         | —                       | —                               | 2,5                                                                         |
| 696                                                                      | 26,66                       | 550                 | 0,778                        | 600                 | 1,040                                          | 400                 | 0,320                                     | 400                 | 27,7                                               | 200                                  | 41,0                                         | —                       | —                               | —                                                                           |
| 760                                                                      | 53,32                       | 700                 | 0,742                        | 800                 | 1,060                                          | 700                 | 0,161                                     | 500                 | 28,4                                               | —                                    | —                                            | 250                     | —                               | —                                                                           |
| Сплав натрия с калием, 56% (вес.) Na и 44% (вес.) K                      |                             |                     |                              |                     |                                                |                     |                                           |                     |                                                    |                                      |                                              |                         |                                 |                                                                             |
| 355                                                                      | 0,133                       | 100                 | 0,847                        | 0                   | 0,995                                          | 103,7               | 0,468                                     | 100                 | 24,4                                               | 50                                   | 37,5                                         | $t_{\text{пл}}$         | 120—110                         | —                                                                           |
| 458                                                                      | 1,333                       | 250                 | 0,811                        | 200                 | 0,910                                          | 167,5               | 0,361                                     | 400                 | 26,6                                               | 100                                  | 41,0                                         | —                       | —                               | 2,5                                                                         |
| 603                                                                      | 13,33                       | 400                 | 0,775                        | 400                 | 0,878                                          | 250                 | 0,280                                     | —                   | —                                                  | 150                                  | 44,0                                         | —                       | —                               | —                                                                           |
| 659                                                                      | 26,66                       | 550                 | 0,739                        | 600                 | 0,877                                          | 400                 | 0,205                                     | —                   | —                                                  | 200                                  | 47,0                                         | —                       | —                               | —                                                                           |
| 721                                                                      | 53,32                       | 700                 | 0,703                        | 800                 | 0,889                                          | 700                 | 0,146                                     | —                   | —                                                  | —                                    | —                                            | 250*                    | —                               | —                                                                           |
| Сплав свинца с висмутом эвтектический, 44,5% (вес.) Pb и 55,5% (вес.) Bi |                             |                     |                              |                     |                                                |                     |                                           |                     |                                                    |                                      |                                              |                         |                                 |                                                                             |
| —                                                                        | —                           | 200                 | 10,46                        | 144                 | 0,146                                          | 332                 | 0,170                                     | 160                 | 10,9                                               | 200                                  | 113                                          | 800                     | 367                             | 0,0                                                                         |
| —                                                                        | —                           | 400                 | 10,19                        | —                   |                                                | 450                 | 0,138                                     | 200                 | 9,27                                               | 300                                  | 118                                          | 1000                    | 356                             | —                                                                           |
| —                                                                        | —                           | 600                 | 9,91                         | —                   |                                                | 500                 | 0,130                                     | 240                 | 9,65                                               | 400                                  | 123                                          | —                       | —                               | —                                                                           |
| —                                                                        | —                           | 800                 | 9,64                         | —                   |                                                | 550                 | 0,123                                     | 300                 | 10,1                                               | 500                                  | 128                                          | —                       | —                               | —                                                                           |
| —                                                                        | —                           | 1000                | 9,36                         | 358                 | 600                                            | 0,117               | 0,117                                     | 320                 | 11,35                                              | —                                    | —                                            | —                       | —                               | —                                                                           |

# ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ, МЕТАЛЛОВ И ИХ СПЛАВОВ

Таблица III-1

Физические свойства твердых веществ (элементов) при 0°С

| Химический элемент | Атомная масса<br>ср | $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | $\beta \cdot 10^6$ , 1/°С | $t_{пл}$ , °С | $t_{кри}$ , °С | $Q_{пл}$ , кДж/кг | $c_p$ , кДж/(кг·°С) | $\lambda_{пл}$ , Вт/(м·°С) | $\beta \cdot 10^6$ , 1/м·см | $\alpha \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с |
|--------------------|---------------------|----------------------------|---------------------------|---------------|----------------|-------------------|---------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|
| Алюминий (Al)      | 26,9815             | 2,70                       | 22,9                      | 660,1         | 2000           | 385,18            | 0,896               | 209,3                      | 2,62                        | 3,2                                     |
| Барий (Ba)         | 137,34              | 3,76                       | —                         | 704           | 1700           | —                 | 0,285               | —                          | —                           | —                                       |
| Бериллий (Be)      | 9,0122              | 1,84                       | 10,5                      | 1280          | 1500           | 1088,57           | 1,675               | 157,0                      | 5,7                         | 183,5                                   |
| Бор (B)            | 10,811              | 2,34                       | 8                         | 2300          | 2550           | 1109,50           | 1,285               | —                          | 0,8                         | —                                       |
| Ванадий (V)        | 50,942              | 5,9                        | —                         | 1720          | 3000           | 334,94            | 0,494               | 34,9                       | 19                          | 43                                      |
| Висмут (Bi)        | 208,980             | 9,83                       | 13,3                      | 271           | 1500           | 54,43             | 0,121               | 9,4                        | 111                         | 28,4                                    |
| Вольфрам (W)       | 183,85              | 19,34                      | 4,3                       | 3380          | 4730           | 255,39            | 0,134               | 168,6                      | 5,00                        | 234                                     |
| Галлий (Ga)        | 69,72               | 5,97                       | 18,1                      | 29,8          | 2300           | 79,55             | 0,343               | 32,6                       | 53                          | 57,2                                    |
| Железо (Fe)        | 55,847              | 7,88                       | 11,3                      | 1535          | 3000           | 267,96            | 0,439               | 74,4                       | 9,0                         | 77,3                                    |
| Золото (Au)        | 196,967             | 19,31                      | 14,15                     | 1063          | 2600           | 66,15             | 0,129               | 312,8                      | 2,19                        | 447                                     |
| Иод (I)            | 126,9044            | 4,93                       | 93                        | 1135          | 185            | 65,98             | 0,218               | 0,418                      | —                           | —                                       |
| Иридий (Ir)        | 192,2               | 22,5                       | 6,5                       | 2443          | 4900           | 117,23            | 0,126               | 60,0                       | 4,85                        | 74,8                                    |
| Кадмий (Cd)        | 112,40              | 8,66                       | 29,0                      | 320,9         | 765            | 52,34             | 0,230               | 93,1                       | 6,5                         | 168                                     |
| Калий (K)          | 39,102              | 0,87                       | 84                        | 63,5          | 759            | 61,13             | 0,737               | 100,0                      | 6,1                         | 560                                     |
| Кальций (Ca)       | 40,08               | 1,54                       | 25                        | 851           | 1400           | 328,66            | 0,657               | —                          | —                           | —                                       |
| Кобальт (Co)       | 58,9332             | 8,8                        | 12,0                      | 1492          | 3200           | 272,14            | 0,448               | 69,8                       | 5,5                         | 63,6                                    |
| Кремний (Si)       | 28,086              | 2,33                       | 2,4                       | 1410          | 2350           | —                 | 0,712*1             | 83,7                       | —                           | —                                       |
| Литий (Li)         | 6,939               | 0,534                      | 60                        | 186           | 1400           | 665,70            | 3,308               | 68,6                       | 8,55                        | 145                                     |
| Магний (Mg)        | 24,312              | 1,76                       | 25,1                      | 650           | 1120           | 209,34            | 0,976               | 158,2                      | 4,2                         | 305                                     |
| Марганец (Mn)      | 54,9381             | 7,40                       | 24                        | 1250          | 1900           | 263,77            | 0,431               | 157,0                      | 265                         | 177                                     |
| Медь (Cu)          | 63,54               | 8,93                       | 16,7                      | 1083          | 2300           | 213,53            | 0,385               | 389,6                      | 1,55                        | 405                                     |
| Молибден (Mo)      | 93,94               | 10,2                       | 5,1                       | 2600          | 3500           | 200,97            | 0,251               | 140,7                      | 5,15                        | 196                                     |
| Мышьяк (As)        | 74,9216             | 5,72                       | 5,0                       | 830           | 625            | —                 | 0,343               | —                          | —                           | —                                       |
| Натрий (Na)        | 22,9898             | 0,975                      | 72                        | 97,6          | 878            | 115,14            | 1,197               | 109,3                      | 4,26                        | 340                                     |
| Неодим (Nd)        | 144,24              | 7,0                        | —                         | 840           | —              | —                 | 0,188*2             | —                          | —                           | —                                       |

Продолжение табл. III-1

| Химический элемент       | Атомная масса | $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | $\beta \cdot 10^6$ , 1/°C | $t_{пл}$ , °C | $t_{кип}$ , °C | $Q_{пл}$ , кДж/кг | $c_p$ , кДж/(кг·°C) | $\lambda_0$ , Вт/(м·°C) | $\rho_0 \cdot 10^6$ , Ом·см | $\alpha \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /ч |
|--------------------------|---------------|----------------------------|---------------------------|---------------|----------------|-------------------|---------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|
| Никель (Ni)              | 58,71         | 8,9                        | 13,4                      | 1453          | 3075           | 301,45            | 0,427               | 67,5                    | 6,5                         | 64                                      |
| Нюбий (Nb)               | 92,906        | 8,5                        | 7,06                      | 1950          | 3700           | —                 | 0,268               | 47,7                    | 14                          | 75,5                                    |
| Олово (Sn)               | 118,69        | 7,3                        | 21                        | 231,9         | 2275           | 58,62             | 0,222               | 66,3                    | 11                          | 148                                     |
| Осмий (Os)               | 190,2         | 22,48                      | 6,1                       | 2500          | 5300           | —                 | 0,129               | —                       | —                           | —                                       |
| Палладий (Pd)            | 106,4         | 12,0                       | 11,8                      | 1555          | 3800           | 150,72            | 0,239               | 70,9                    | —                           | 88                                      |
| Платина (Pt)             | 195,09        | 21,46                      | 8,95                      | 1769          | 4000           | 104,67            | 0,129               | 69,8                    | 9,8                         | 88,5                                    |
| Рений (Re)               | 186,20        | 20,5                       | 12,45                     | 3150          | 5870           | —                 | 0,133               | 21,1                    | 21,1                        | —                                       |
| Родий (Rh)               | 102,905       | 12,44                      | 7,85                      | 1960          | 4500           | 217,71            | 0,243               | 89,6                    | 4,3                         | 106                                     |
| Рубидий (Rb)             | 85,47         | 1,54                       | 90                        | 39            | 696            | 25,54             | 0,335               | 46,5                    | 11,4                        | 324                                     |
| Свинец (Pb)              | 207,19        | 11,35                      | 28,3                      | 327,3         | 1750           | 23,03             | 0,126               | 35,1                    | 19,0                        | 87,5                                    |
| Селен (Se)               | 78,96         | 4,4                        | 37                        | 220           | 688            | 66,66             | 0,352*1             | 0,291                   | 1,2*4                       | —                                       |
| Сера (S):<br>ромбическая | 32,064        | 2,06                       | 74                        | 112,8         | 444,6          | 39,36             | 0,733               | 0,209                   | —                           | —                                       |
| монокристаллическая      | 32,064        | 1,96                       | 80                        | 119,0         | —              | 46,05             | —                   | —                       | —                           | —                                       |
| Серебро (Ag)             | 107,870       | 10,50                      | 19,49                     | 960,5         | 2100           | 104,67            | 0,234               | 418,7                   | 1,50                        | 612                                     |
| Сурьма (Sb)              | 121,75        | 6,69                       | 9,2                       | 630,5         | 1640           | 163,29            | 0,205               | 18,8                    | 36,3                        | 49,5                                    |
| Таллий (Tl)              | 204,37        | 11,85                      | 28                        | 302,5         | 1450           | 20,93             | 0,134*3             | 37,2                    | 18                          | —                                       |
| Тантал (Ta)              | 180,948       | 16,6                       | 6,5                       | 3000          | 5300           | 154,91            | 0,138               | 54,7                    | 13,1                        | —                                       |
| Теллур (Te)              | 127,60        | 6,24                       | 16                        | 452           | 1390           | 29,31             | 0,201*3             | 25,1                    | 0,3                         | —                                       |
| Титан (Ti)               | 47,90         | 4,54                       | 7,7                       | 1800          | 3400           | 376,81            | 0,532               | 15,1                    | 56                          | 22,4                                    |
| Торий (Th)               | 232,038       | 11,7                       | 11                        | 1827          | 3526           | —                 | 0,117               | —                       | 13*1                        | —                                       |
| Углерод (C):<br>алмаз    | 12,01115      | 13,51                      | 0,91                      | 3540          | 4000           | —                 | —                   | 629                     | —                           | —                                       |
| графит                   | 12,01         | 1,7—2,3                    | 7,9                       | 3540          | 4000           | —                 | 0,669               | 174,5                   | 2000                        | 440                                     |
| Уран (U)                 | 238,03        | 19,1                       | 23                        | 1133          | 3927           | —                 | 0,117               | 19,2                    | 30,6                        | 30,9                                    |
| Фосфор (P)               | 30,975        | 1,82                       | 125                       | 44,1          | 280            | 21,77             | —                   | —                       | —                           | —                                       |
| Хром (Cr)                | 51,996        | 7,15                       | 5,9                       | 1830          | 2300           | 316,10            | 0,448               | 69,8                    | 14,5                        | 78,5                                    |
| Цезий (Cs)               | 132,905       | 1,87                       | 97                        | 28            | 670            | 15,91             | 0,201               | 20,9                    | 78                          | —                                       |
| Церий (Ce)               | 140,12        | 6,8                        | —                         | 815           | 1400           | —                 | 0,209*1             | —                       | —                           | —                                       |
| Цинк (Zn)                | 65,37         | 7,15                       | 30                        | 419,5         | 905,7          | 104,67            | 0,381               | 112,8                   | 5,5                         | 148                                     |
| Цирконий (Zr)            | 91,22         | 6,53                       | 6,3                       | 1900          | 2900           | 251,21            | 0,276               | —                       | 41                          | —                                       |

\*1 При 20°C. \*2 При 18°C. \*\* 60°C. \*\*1 При 200°C.

Таблица III-2

## Теплофизические свойства металлов и сплавов

| Металлы         | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>                             | $c_p$ , кДж/(кг·°C) | $\alpha \cdot 10^2$ , м <sup>2</sup> /ч | Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·°C), при температуре, °C |       |       |       |       |       |          |       |       |      |      |   |
|-----------------|--------------------------------------------------------|---------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|------|------|---|
|                 |                                                        |                     |                                         | -100                                                                    | 0     | 20    | 100   | 200   | 300   | 400      | 600   | 800   | 1000 | 1200 |   |
| Алюминий:       | чистый                                                 | 2700                | 0,896                                   | 34,0                                                                    | 231,9 | 228,4 | 228   | 228,4 | 228,4 | 228,4    | 228,4 | —     | —    | —    | — |
|                 | сплав Al—Cu (дуралюминий 94—96% Al; 3—5% Cu; следы Mg) | 2800                | 0,883                                   | 24,0                                                                    | 126,3 | 159,2 | 164,5 | 181,7 | 183,9 | —        | —     | —     | —    | —    | — |
|                 | сплав Al—Mg (91—95% Al; 5—9% Mg)                       | 2600                | 0,904                                   | 17,3                                                                    | 93,4  | 108,9 | 112,5 | 126,3 | 141,9 | —        | —     | —     | —    | —    | — |
|                 | сплав Al—Si (87% Al; 13% Si)                           | 2660                | 0,871                                   | 25,8                                                                    | 148,9 | 162,8 | 163,9 | 174,5 | 184,9 | —        | —     | —     | —    | —    | — |
|                 | сплав Al—Si (86,5% Al; 12,5% Si; 1% Cu)                | 2660                | 0,867                                   | 21,5                                                                    | 119,4 | 137,2 | 136,8 | 144,2 | 152,4 | 160,9    | —     | —     | —    | —    | — |
|                 | сплав Al—Si (78—80% Al; 20—22% Si)                     | 2630                | 0,854                                   | 25,7                                                                    | 143,6 | 157,5 | 160,9 | 167,5 | 174,8 | 177,9    | —     | —     | —    | —    | — |
|                 | сплав Al—Mg—Si (97% Al; 1% Mg; 1% Si; 1% Mn)           | 2700                | 0,892                                   | 26,6                                                                    | —     | 174,8 | 176,8 | 188,6 | 204,7 | —        | —     | —     | —    | —    | — |
|                 | Свинец                                                 | 11350               | 0,129                                   | 8,6                                                                     | 36,9  | 35,1  | 34,7  | 33,4  | 31,5  | 29,8     | —     | —     | —    | —    | — |
|                 | Медь (чистая)                                          | 8950                | 0,385                                   | 40,40                                                                   | 407,1 | 386,1 | 386,1 | 379,1 | 373,3 | —        | 364,0 | 353,6 | —    | —    | — |
|                 | Алюминиевая бронза (95% Cu; 5% Al)                     | 8660                | 0,410                                   | 8,39                                                                    | —     | —     | —     | —     | —     | —        | —     | —     | —    | —    | — |
|                 | Бронза (75% Cu; 25% Sn)                                | 8660                | 0,343                                   | 3,10                                                                    | —     | —     | —     | —     | —     | —        | —     | —     | —    | —    | — |
|                 | Красная латунь $\epsilon$ (85% Cu; 9% Sn; 6% Zn)       | 8710                | 0,385                                   | 6,49                                                                    | —     | 58,8  | 60,5  | 70,9  | —     | —        | —     | —     | —    | —    | — |
|                 | Латунь (70% Cu; 30% Zn)                                | 8520                | 0,385                                   | 12,30                                                                   | 88,3  | —     | 110,7 | 129,1 | 143,6 | 147,1    | —     | —     | —    | —    | — |
|                 | Константан (60% Cu; 40% Ni)                            | 8820                | 0,410                                   | 2,20                                                                    | 220,6 | —     | 22,7  | 22,2  | 25,9  | —        | —     | —     | —    | —    | — |
|                 | Нейзильбер (62% Cu; 15% Ni; 22% Zn)                    | 8613                | 0,394                                   | 2,69                                                                    | 18,9  | —     | 24,9  | 31,2  | 45,0  | 45,0     | 48,5  | —     | —    | —    | — |
| Магний (чистый) | 1745                                                   | 1,013               | 35,00                                   | 177,9                                                                   | 170,9 | 170,9 | 170,9 | 167,5 | 162,8 | 157,0    | —     | —     | —    | —    |   |
| Молниеносен     | сплав Mg—Al 6—8% Al; 1—2% Zn                           | 1810                | 1,004                                   | 13,00                                                                   | —     | 51,9  | 65,7  | 62,3  | 74,4  | 86,5     | —     | —     | —    | —    | — |
|                 | сплав Mg—Mn (2% Mn)                                    | 1809                | 1,004                                   | 23,00                                                                   | 93,5  | 110,7 | 114,2 | 124,6 | 130,3 | —        | —     | —     | —    | —    | — |
|                 | Никель:                                                | 10214               | 0,252                                   | 19,3                                                                    | 138,4 | 137,2 | 137,2 | 137,2 | —     | —        | —     | —     | —    | —    | — |
|                 | чистый (99,9%)                                         | 8900                | 0,460                                   | 8,20                                                                    | 107,9 | 93,5  | 90,0  | 83,0  | 72,7  | 64,0     | 58,8  | —     | —    | —    | — |
|                 | неочищенный (99,2%)                                    | 8900                | 0,460                                   | 6,29                                                                    | —     | 69,2  | 64,1  | 58,8  | 55,4  | 51,9     | —     | —     | —    | —    | — |
|                 | сплав Ni—Cr (90% Ni; 10% Cr)                           | 8660                | 0,460                                   | 1,60                                                                    | —     | 17,1  | 17,3  | 18,8  | 20,9  | 22,8     | 24,5  | —     | —    | —    | — |
|                 | сплав Ni—Cr (80% Ni; 20% Cr)                           | 8310                | 0,460                                   | 1,20                                                                    | —     | 12,3  | 12,7  | 13,8  | 15,6  | 17,1     | 18,8  | —     | —    | —    | — |
|                 | Серебро:                                               |                     |                                         |                                                                         |       |       |       |       |       |          |       |       |      |      |   |
|                 | высокоочищенное                                        | 10520               | 0,252                                   | 61,30                                                                   | 418,7 | 417,5 | 418,7 | 415,2 | 411,7 | —        | —     | —     | —    | —    | — |
|                 | чистое (99,9%)                                         | 10520               | 0,252                                   | 59,60                                                                   | 418,7 | 410,5 | 407,3 | 392,0 | 373,3 | 360,5    | 360,5 | —     | —    | —    | — |
| Вольфрам        | 19300                                                  | 0,126               | 22,6                                    | —                                                                       | 166,3 | 162,8 | 150,0 | 141,9 | 133,7 | 126,8    | 112,8 | 76,2  | —    | —    |   |
| Цинк (чистый)   | 7140                                                   | 0,386               | 14,8                                    | 114,2                                                                   | 112,5 | 112,1 | 108,9 | 105,6 | 100,4 | 93,4     | —     | —     | —    | —    |   |
| Олово (чистое)  | 7300                                                   | 0,226               | 14,0                                    | 74,4                                                                    | 65,9  | 64,1  | 58,8  | 57,1  | —     | —        | —     | —     | —    | —    |   |
| Титан           | 4540,6                                                 | 0,532               | 2,27                                    | —                                                                       | 15,1  | —     | 15,7  | —     | 16,9  | 18(500°) | —     | —     | —    | —    |   |

Примечание. Плотность, теплоемкость и температуропроводность приведены при 20°C.

Коэффициент теплопроводности металлов  $\lambda$ , Вт/(м·°С), в зависимости от температуры

- 47 -

Продолжение табл. III-3

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\lambda$ | $t, ^\circ\text{C}$                                                                                                                                                                                                                                                                          | $\lambda$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\lambda$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\lambda$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\lambda$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\lambda$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\lambda$ |
|---------------------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------------------|-----------|---------------------|-----------|---------------------|-----------|---------------------|-----------|---------------------|-----------|
| 400                 | 52,3      | <div>Палладий</div> <div>Никель (99,97%)</div> <div>Платина (99,99%)</div> <div>Серебро (99,9%)</div> <div>Свинец (99,99%)</div> <div>Цинк (99,93%)</div> <div>Цирконий (97%)</div> <div>Уран</div> <div>Сурьма (99,99%)</div> <div>Олово</div> <div>Родий</div> <div>Серебро (99,98%)</div> |           |                     |           |                     |           |                     |           |                     |           |                     |           |
| 600                 | 56,9      |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |           |                     |           |                     |           |                     |           |                     |           |                     |           |
| 800                 | 65,1      |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |           |                     |           |                     |           |                     |           |                     |           |                     |           |
| -50                 | 63,9      | 100                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 76,8      | 100                 | 80,2      | -100                | 419,8     | -200                | 117,5     | 500                 | 20,4      | 0                   | 54,7      |
| 0                   | 61,6      | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 68,6      | 150                 | 75,0      | 0                   | 410,5     | -100                | 115,1     | 600                 | 21,5      | 100                 | 54,1      |
| 100                 | 56,9      | 100                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 73,3      | 250                 | 48,8      | 100                 | 391,9     | 0                   | 112,8     | 700                 | 22,9      | 200                 | 63,9      |
| 200                 | 54,7      | <div>Цинк (99,93%)</div> <div>Цирконий (97%)</div> <div>Уран</div> <div>Сурьма (99,99%)</div> <div>Олово</div> <div>Родий</div> <div>Серебро (99,98%)</div>                                                                                                                                  |           |                     |           |                     |           |                     |           |                     |           |                     |           |
| 400                 | 48,8      |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |           |                     |           |                     |           |                     |           |                     |           |                     |           |
| 600                 | 52,3      |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |           |                     |           |                     |           |                     |           |                     |           |                     |           |
| 800                 | 58,2      |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |           |                     |           |                     |           |                     |           |                     |           |                     |           |
| -100                | 67,8      | 100                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 73,3      | 200                 | 73,7      | 100                 | 372,2     | 100                 | 108,7     | 100                 | 11,9      | 200                 | 13,3      |
| 0                   | 69,8      | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 68,6      | 300                 | 71,8      | 200                 | 361,7     | 200                 | 104,7     | 300                 | 13,3      | 300                 | 14,5      |
| 100                 | 71,8      | 100                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 73,3      | 400                 | 67,8      | 300                 | 361,7     | 300                 | 100,0     | 400                 | 14,5      | 400                 | 15,6      |
| 200                 | 73,7      | 200                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 73,7      | 500                 | 67,8      | 400                 | 366,3     | 400                 | 95,4      | 500                 | 15,6      | 500                 | 16,7      |
| 400                 | 77,7      | 400                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 77,7      | 600                 | 67,8      | 500                 | 374,5     | 500                 | 95,4      | 600                 | 16,7      | 600                 | 18,0      |
| 600                 | 81,6      | 600                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 81,6      | 100                 | 32,8      | 600                 | 374,5     | 600                 | 95,4      | 100                 | 18,0      | 100                 | 18,0      |
| 800                 | 85,6      | 800                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 85,6      | 200                 | 31,9      | 100                 | 374,5     | 100                 | 95,4      | 200                 | 18,0      | 200                 | 18,0      |
| 1000                | 89,6      | 1000                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 89,6      | 300                 | 30,2      | 200                 | 374,5     | 200                 | 95,4      | 300                 | 18,0      | 300                 | 18,0      |
| 1100                | 101,2     | 1100                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 101,2     | 327                 | 30,0      | 300                 | 374,5     | 300                 | 95,4      | 400                 | 18,0      | 400                 | 18,0      |
| -150                | 79,1      | <div>Цинк (99,93%)</div> <div>Цирконий (97%)</div> <div>Уран</div> <div>Сурьма (99,99%)</div> <div>Олово</div> <div>Родий</div> <div>Серебро (99,98%)</div>                                                                                                                                  |           |                     |           |                     |           |                     |           |                     |           |                     |           |
| 0                   | 66,1      |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |           |                     |           |                     |           |                     |           |                     |           |                     |           |
| 50                  | 63,2      |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |           |                     |           |                     |           |                     |           |                     |           |                     |           |
| 100                 | 60,8      | <div>Цинк (99,93%)</div> <div>Цирконий (97%)</div> <div>Уран</div> <div>Сурьма (99,99%)</div> <div>Олово</div> <div>Родий</div> <div>Серебро (99,98%)</div>                                                                                                                                  |           |                     |           |                     |           |                     |           |                     |           |                     |           |
| 150                 | 59,2      |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |           |                     |           |                     |           |                     |           |                     |           |                     |           |
| 200                 | 57,9      |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |           |                     |           |                     |           |                     |           |                     |           |                     |           |
| 230                 | 57,3      | <div>Цинк (99,93%)</div> <div>Цирконий (97%)</div> <div>Уран</div> <div>Сурьма (99,99%)</div> <div>Олово</div> <div>Родий</div> <div>Серебро (99,98%)</div>                                                                                                                                  |           |                     |           |                     |           |                     |           |                     |           |                     |           |
| -50                 | 93,0      |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |           |                     |           |                     |           |                     |           |                     |           |                     |           |
| 0                   | 89,1      |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |           |                     |           |                     |           |                     |           |                     |           |                     |           |
| 50                  | 84,9      |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |           |                     |           |                     |           |                     |           |                     |           |                     |           |

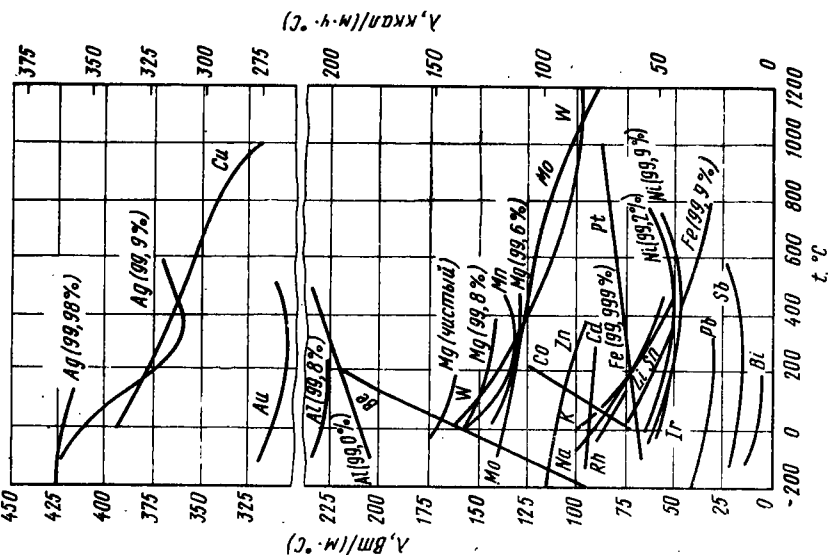


Рис. 12. Зависимость коэффициента теплопроводности металлов от температуры  $t$

Таблица III-4

Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  некоторых цветных металлов и технических сплавов

| Наименование сплава             | Химический состав, %                                                                                                     | $\lambda$ , Вт/(м·°C), при температуре, °C |                              |                              |                              |                              |                     |                        |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------|------------------------|
|                                 |                                                                                                                          | 0                                          | 100                          | 200                          | 300                          | 400                          | 500                 | 600                    |
| Никель чистотой 99,2%           | —                                                                                                                        | 67,5                                       | 62,8                         | 58,2                         | —                            | 52,3                         | —                   | 56,9                   |
| Нихром                          | 10 Cr, остальное никель<br>20 Cr, остальное никель<br>15 Cr+20 Fe+4 Mn, остальное никель                                 | 17,1<br>12,2<br>11,6<br>11,8               | 18,9<br>13,8<br>11,9<br>13,3 | 20,9<br>15,6<br>12,2<br>14,6 | 22,8<br>17,2<br>12,4<br>16,5 | 24,7<br>18,9<br>12,7<br>17,4 | —<br>—<br>12,9<br>— | —<br>22,6<br>13,1<br>— |
| Монель                          | 16 Cr + 23 F, остальное никель<br>40 Cu, остальное никель<br>29 Cu+Fe, остальное никель<br>12 Cr+25 Fe, остальное никель | 20,1<br>20,1<br>13,5                       | 25,6<br>24,4<br>14,9         | 32,8<br>27,6<br>15,2         | 39,7<br>30,2<br>15,5         | —<br>33,7<br>15,7            | —<br>—<br>15,8      | —<br>—<br>16,2         |
| Сплавы никеля<br>по ГОСТ 492—58 |                                                                                                                          |                                            |                              |                              |                              |                              |                     |                        |
| Мельхиор:                       |                                                                                                                          |                                            |                              |                              |                              |                              |                     |                        |
| НМ81                            | 19 Ni+1Co, остальное медь                                                                                                | 37,7                                       | —                            | —                            | —                            | —                            | —                   | —                      |
| НМ70                            | 30 Ni+1Co, остальное медь                                                                                                | 37,1                                       | —                            | —                            | —                            | —                            | —                   | —                      |
| Константан НММц 58,5—1,54       | 40,0 Ni + 1,5 Mn, остальное медь                                                                                         | 20,9                                       | 23,2                         | 26,3                         | 30,6                         | 37,2                         | —                   | —                      |
| Копель НМ 56,5                  | 43,0 Ni, остальное медь                                                                                                  | 24,2                                       | —                            | —                            | —                            | —                            | —                   | —                      |
| Монель НМЖМц и К-монель         | 25,0 Fe+57,0 Ni+1,6 Mn, остальное медь                                                                                   | 25,1                                       | —                            | —                            | —                            | —                            | —                   | —                      |
| Алюмель                         | 2,0 Al+94,0 Ni+2,0 Mn                                                                                                    | 32,7                                       | —                            | —                            | —                            | —                            | —                   | —                      |
| Хромель                         | 90,0 Ni+9 Cr+1 Co                                                                                                        | 16,0                                       | 17,8                         | 19,8                         | 21,6                         | 23,5                         | —                   | —                      |
| Манганин НММц 85—12             | Cu+3,0 Ni+12,0 Mn                                                                                                        | 21,7                                       | 26,4                         | 31,4                         | 36,1                         | —                            | —                   | —                      |

| Наименование сплава                   | Химический состав, %                            | λ, Вт/(м·°С), при температуре, °С |       |       |       |     |     |     |
|---------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-----|-----|-----|
|                                       |                                                 | 0                                 | 100   | 200   | 300   | 400 | 500 | 600 |
| Инвар . . . . .                       | 65,0 Fe+35,0 Ni                                 | 11,0                              | 11,4  | 11,9  | 12,7  | —   | —   | —   |
| Магнелиевые сплавы<br>по ГОСТ 2856—68 |                                                 |                                   |       |       |       |     |     |     |
| Электрон . . . . .                    | 92 Mg+8,0 Al                                    | 61,6                              | 70,0  | 79,3  | 88,9  | —   | —   | —   |
| Платиноидный . . . . .                | 88 Mg+10,0 Al+2,0 Si                            | 58,2                              | 66,4  | 75,9  | —     | —   | —   | —   |
| Платиноидный . . . . .                | 92 Mg+8,0 Cu                                    | 125,9                             | 130,0 | 133,3 | 139,2 | —   | —   | —   |
| Платиноидный . . . . .                | 93 Mg+0,5 Cu+4,0 Zn                             | 117,5                             | 130,9 | —     | —     | —   | —   | —   |
| Платиноидный . . . . .                | 90 Pt+10 Ir                                     | 30,9                              | 31,4  | 32,4  | —     | —   | —   | —   |
| Платиноидный . . . . .                | 90 Pt+10Rh                                      | 30,2                              | 30,6  | 31,6  | —     | —   | —   | —   |
| Мягкие припои<br>по ГОСТ 1499—70:     |                                                 |                                   |       |       |       |     |     |     |
| олово чистое . . . . .                | —                                               | 66,1                              | 59,3  | 56,9  | —     | —   | —   | —   |
| свинец чистый . . . . .               | —                                               | 35,1                              | 33,4  | 32,2  | 29,8  | —   | —   | —   |
| ПОС-90 . . . . .                      | 89—90 Sn, не более 0,15 Sb,<br>остальное свинец | 62,6                              | —     | —     | —     | —   | —   | —   |
| ПОС-40 . . . . .                      | 40,0 Sn+2 Sb, остальное свинец                  | 39,8                              | —     | —     | —     | —   | —   | —   |
| ПОС-30 . . . . .                      | 30,0 Sn+2 Sb, остальное свинец                  | 38,1                              | —     | —     | —     | —   | —   | —   |
| ПОС-18 . . . . .                      | 18,0 Sn+2,5 Sb, остальное сви-<br>нец           | 38,5                              | —     | —     | —     | —   | —   | —   |
| Металл Розе . . . . .                 | 50 Bi+25 Sn+25 Pb                               | 16,3                              | —     | —     | —     | —   | —   | —   |
| Металл Вуда . . . . .                 | 48 Bi+13 Cd+13 Sn+26 Pb                         | 12,8                              | —     | —     | —     | —   | —   | —   |

Таблица III-5

Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  и температура плавления  $t_{пл}$  технических сплавов меди

| Наименование сплава                                     | Химический состав, %                                                | $t_{пл}$ , °C | $\lambda$ , Вт/(м·°C), при температуре, °C |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------|--------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                         |                                                                     |               | 0                                          | 100   | 200   | 300   | 400   | 500   | 600   |
| Медь чистой 99,8%<br>Латуни (ГОСТ 1019—47):             |                                                                     |               |                                            |       |       |       |       |       |       |
| Л-96 . . . . .                                          | 95,0—97,0 Cu+0,2 примеси, остальное цинк                            | 1080          | 386,1                                      | 379,1 | 373,3 | —     | 364,0 | —     | 353,6 |
| Л-90 . . . . .                                          | 88,0—91,0 Cu+0,2 примеси, остальное цинк                            | 1070          | 244,2                                      | —     | 246,6 | —     | 254,7 | —     | —     |
| Л-80 . . . . .                                          | 79,0—81,0 Cu+0,2 примесей, остальное цинк                           | 1045          | 113,9                                      | 125,6 | 141,9 | 157,0 | 174,5 | 188,4 | 203,5 |
| Л-68 . . . . .                                          | 67,0—70,0 Cu+0,3 примесей, остальное цинк                           | 1003          | 111,6                                      | 115,1 | 117,5 | 122,1 | 127,9 | 134,9 | 144,2 |
| Л-62 . . . . .                                          | 60,5—63,5 Cu+0,5 примесей, остальное цинк                           | 938           | 105,8                                      | 109,3 | 110,5 | 113,9 | 116,3 | 119,8 | 120,9 |
| Л-59—3—2 . . . . .                                      | 57,0—60,0 Cu + 2,5—3,5 Al + +2,0—3,0 Ni+0,9 примеси, остальное цинк | 905           | 105,8                                      | 119,8 | 137,2 | 152,4 | 168,6 | 186,1 | 200,0 |
| ЛМц 58—2 . . . . .                                      | 57,0—60,0 Cu+1,0—2,0 Mn+1,2 примеси, остальное цинк                 | 956           | 83,7                                       | 96,5  | 109,3 | 122,1 | 134,9 | 143,0 | 152,4 |
| ЛС-59—1 . . . . .                                       | 57,0—60,0 Cu+0,8—1,3 Pb+0,75 примеси, остальное цинк                | 880           | 70,2                                       | 81,4  | 90,7  | 100,0 | 108,7 | 117,5 | 122,1 |
| ЛС-59—1В . . . . .                                      | 57,0—60,0 Cu+0,8—1,9 Pb+1,5 примеси, остальное цинк                 | 900           | 104,7                                      | 116,3 | 127,9 | 140,7 | 155,8 | 169,8 | 182,6 |
| ЛО-62—1 . . . . .                                       | 61,0—63,0 Cu+0,7—1,1 Sn+0,3 примеси, остальное цинк                 | 900           | 103,5                                      | 114,6 | 125,6 | 136,1 | 147,7 | 157,0 | —     |
| ЛО-70—1 . . . . .                                       | 69,0—71,0 Cu+1,0—1,5 Sn+0,3 примеси, остальное цинк                 | 906           | 98,9                                       | —     | —     | —     | —     | —     | —     |
| ЛТО-90—1 . . . . .                                      | 88,0—91,0 Cu+0,25—0,75 Sn+ +0,2 примеси, остальное цинк             | 980           | 91,9                                       | —     | —     | 134,9 | —     | —     | —     |
| Нейзильбер МНЦ . . . . .                                | 18—22,0 Zn+13,5—16,5 Ni+0,9 примеси, остальное медь                 | 1015          | 124,4                                      | 140,8 | 157,0 | 174,0 | 194,2 | 209,3 | 222,1 |
| Бронзы (ГОСТ 613 — 65, 1761 — 70, ЦМТУ 572—41, 669—41): |                                                                     |               |                                            |       |       |       |       |       |       |
| Бр О—10 . . . . .                                       | 9—11 Sn, остальное медь                                             | 1020          | 48,1                                       | 52,3  | 55,9  | —     | —     | —     | —     |
| Бр ОЦ10—2 . . . . .                                     | 3,0 Zn+10,0 Sn, остальное медь                                      | 980           | 55,4                                       | 56,4  | 63,4  | 68,0  | 72,1  | 74,7  | 76,8  |
| Бр ОЦ18—4 . . . . .                                     | 5,0 Zn+8,0 Sn, остальное медь                                       | 995           | 68,3                                       | 76,8  | 82,6  | 88,4  | 93,0  | 95,7  | 99,8  |
| Бр ОЦ16—6—3 . . . . .                                   | 6,0 Zn+6,0 Sn+3,0 Pb, остальное медь                                | 967           | 63,7                                       | 70,9  | 76,9  | 81,6  | 86,6  | 90,7  | 93,0  |



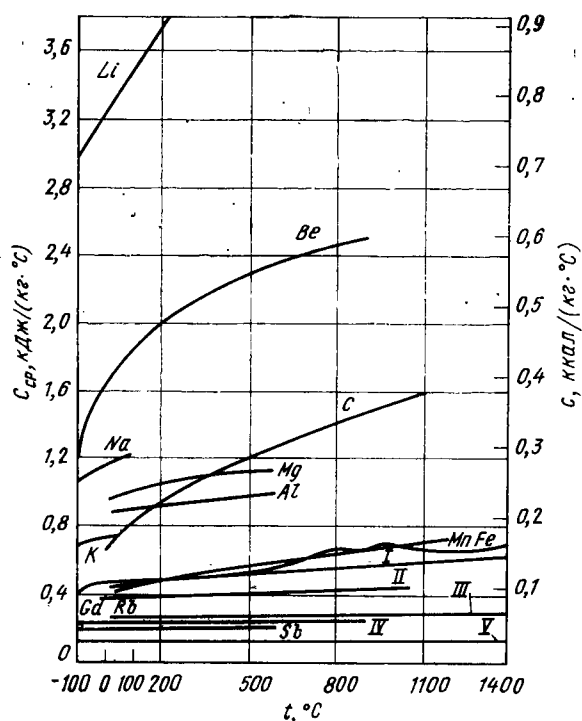
Таблица III-6

Средняя теплоемкость металлов  $c_{\text{ср}}$ , кДж/(кг·°C) в зависимости от температуры

| $t$ , °C        | $c_{\text{ср}}$ | $t$ , °C      | $c_{\text{ср}}$ | $t$ , °C        | $c_{\text{ср}}$ | $t$ , °C      | $c_{\text{ср}}$ | $t$ , °C     | $c_{\text{ср}}$ | $t$ , °C      | $c_{\text{ср}}$ | $t$ , °C        | $c_{\text{ср}}$ | $t$ , °C       | $c_{\text{ср}}$ |  |  |  |  |
|-----------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|-----------------|--------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|--|--|--|--|
| <b>Алюминий</b> |                 |               |                 |                 |                 |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
| 0               | 0,895           | 400           | 0,528           | <b>Галлий</b>   |                 | <b>Иридий</b> |                 | <b>Литий</b> |                 | <b>Натрий</b> |                 | <b>Медь</b>     |                 | <b>Платина</b> |                 |  |  |  |  |
| 50              | 0,904           | 600           | 0,536           | -10             | 0,352           | 0             | 0,1285          | 400          | 0,477           | 400           | 0,540           | 1200            | 0,293           | 0              | 0,1310          |  |  |  |  |
| 100             | 0,913           | 800           | 0,549           |                 |                 | 200           | 0,1315          | 600          | 0,502           | 600           | 0,595           | 1400            | 0,297           | 200            | 0,1344          |  |  |  |  |
| 150             | 0,925           | 1000          | 0,565           |                 |                 | 400           | 0,1348          | 800          | 0,532           | 800           | 0,624           | 0               |                 | 400            | 0,1373          |  |  |  |  |
| 200             | 0,938           | 1200          | 0,586           |                 |                 | 1000          | 0,1377          | 1000         | 0,574           | 1000          | 0,678           |                 |                 | 600            | 0,1403          |  |  |  |  |
| 300             | 0,955           | 1400          | 0,641           |                 |                 | 1200          | 0,1407          | 1200         | 0,619           | 1200          | 0,724           |                 |                 | 800            | 0,1428          |  |  |  |  |
| 400             | 0,979           | <b>Висмут</b> |                 |                 |                 |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
| 500             | 0,996           | 0             | 0,1235          | <b>Железо</b>   |                 | <b>Кадмий</b> |                 | <b>Калий</b> |                 | <b>Магний</b> |                 | <b>Молибден</b> |                 | <b>Родий</b>   |                 |  |  |  |  |
| 600             | 1,022           | 0             | 0,1248          | 0               | 0,439           | -200          | 2,63            | -200         | 2,63            | -150          | 1,022           | 0               | 0,389           | 0              | 0,1310          |  |  |  |  |
|                 |                 | 50            | 0,1260          | 100             | 0,461           | -100          | 3,06            | -100         | 3,06            | -100          | 1,076           | 100             | 0,394           | 100            | 0,1344          |  |  |  |  |
|                 |                 | 100           | 0,1273          | 200             | 0,482           | 0             | 3,31            | 0            | 3,31            | -50           | 1,143           | 200             | 0,398           | 200            | 0,1373          |  |  |  |  |
|                 |                 | 150           | 0,1285          | 400             | 0,523           | 50            | 3,42            | 50           | 3,42            | -50           | 1,197           | 400             | 0,406           | 400            | 0,1403          |  |  |  |  |
|                 |                 | 200           | 0,1298          | 600             | 0,578           | 100           | 3,56            | 70           | 1,261           | 0             | 1,244           | 600             | 0,414           | 600            | 0,1428          |  |  |  |  |
|                 |                 | 250           | 0,1298          | 800             | 0,645           | 150           | 3,68            | 90           | 1,244           | 0             | 1,197           | 800             | 0,423           | 800            | 0,1453          |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 900             | 0,666           | 180           | 3,77            |              |                 | 20            | 1,206           | 1000            | 0,431           | 1000           | 0,1507          |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1000            | 0,682           |               |                 |              |                 | 50            | 1,223           |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1200            | 0,678           |               |                 |              |                 | 90            | 1,244           |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1400            | 0,678           |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1500            | 0,695           |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | <b>Вольфрам</b> |                 |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 0               | 0,1339          | 0             | 0,976           | 0            | 0,976           | 0             | 0,427           | 0               | 0,251           | 0              | 0,2437          |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 200             | 0,1361          | 100           | 1,029           | 100          | 1,029           | 100           | 0,448           | 200             | 0,259           | 200            | 0,2332          |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 400             | 0,1382          | 200           | 1,059           | 200          | 1,059           | 200           | 0,473           | 400             | 0,264           | 400            | 0,2361          |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 600             | 0,1403          | 300           | 1,089           | 300          | 1,089           | 400           | 0,511           | 600             | 0,268           | 600            | 0,2391          |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 800             | 0,1424          | 400           | 1,114           | 400          | 1,114           | 600           | 0,519           | 800             | 0,276           | 800            | 0,2424          |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1000            | 0,1444          | 500           | 1,135           | 500          | 1,135           | 800           | 0,523           | 1000            | 0,281           | 1000           | 0,2445          |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1200            | 0,1465          | 600           | 1,147           | 600          | 1,147           | 1000          | 0,528           | 1200            | 0,285           | 1200           | 0,2474          |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1400            | 0,1486          |               |                 |              |                 |               |                 | 1400            | 0,285           | 1400           | 0,2525          |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1600            | 0,1507          |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1800            | 0,1528          |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | <b>Цинк</b>     |                 |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 0               | 0,1339          | 0             | 0,669           | 0            | 0,669           | 0             | 0,268           | 0               | 0,293           | 0              | 0,335           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 200             | 0,1361          | -100          | 0,729           | -100         | 0,729           | 200           | 0,272           | 200             | 0,293           | 200            | 0,339           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 400             | 0,1382          | -50           | 0,733           | -50          | 0,733           | 400           | 0,276           | 400             | 0,293           | 400            | 0,343           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 600             | 0,1403          | -20           | 0,737           | -20          | 0,737           | 600           | 0,281           | 600             | 0,293           | 600            | 0,343           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 800             | 0,1424          | 0             | 0,741           | 0            | 0,741           | 800           | 0,285           | 800             | 0,293           | 800            | 0,343           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1000            | 0,1444          | 20            | 0,745           | 20           | 0,745           | 1000          | 0,289           | 1000            | 0,293           | 1000           | 0,343           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1200            | 0,1465          | 50            | 0,745           | 50           | 0,745           |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1400            | 0,1486          |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1600            | 0,1507          |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1800            | 0,1528          |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | <b>Сурьма</b>   |                 |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 0               | 0,1339          | 0             | 0,669           | 0            | 0,669           | 0             | 0,268           | 0               | 0,293           | 0              | 0,335           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 200             | 0,1361          | -100          | 0,729           | -100         | 0,729           | 200           | 0,272           | 200             | 0,293           | 200            | 0,339           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 400             | 0,1382          | -50           | 0,733           | -50          | 0,733           | 400           | 0,276           | 400             | 0,293           | 400            | 0,343           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 600             | 0,1403          | -20           | 0,737           | -20          | 0,737           | 600           | 0,281           | 600             | 0,293           | 600            | 0,343           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 800             | 0,1424          | 0             | 0,741           | 0            | 0,741           | 800           | 0,285           | 800             | 0,293           | 800            | 0,343           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1000            | 0,1444          | 20            | 0,745           | 20           | 0,745           | 1000          | 0,289           | 1000            | 0,293           | 1000           | 0,343           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1200            | 0,1465          | 50            | 0,745           | 50           | 0,745           |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1400            | 0,1486          |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1600            | 0,1507          |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1800            | 0,1528          |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | <b>Хром</b>     |                 |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 0               | 0,1339          | 0             | 0,669           | 0            | 0,669           | 0             | 0,268           | 0               | 0,293           | 0              | 0,335           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 200             | 0,1361          | -100          | 0,729           | -100         | 0,729           | 200           | 0,272           | 200             | 0,293           | 200            | 0,339           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 400             | 0,1382          | -50           | 0,733           | -50          | 0,733           | 400           | 0,276           | 400             | 0,293           | 400            | 0,343           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 600             | 0,1403          | -20           | 0,737           | -20          | 0,737           | 600           | 0,281           | 600             | 0,293           | 600            | 0,343           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 800             | 0,1424          | 0             | 0,741           | 0            | 0,741           | 800           | 0,285           | 800             | 0,293           | 800            | 0,343           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1000            | 0,1444          | 20            | 0,745           | 20           | 0,745           | 1000          | 0,289           | 1000            | 0,293           | 1000           | 0,343           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1200            | 0,1465          | 50            | 0,745           | 50           | 0,745           |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1400            | 0,1486          |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1600            | 0,1507          |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1800            | 0,1528          |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | <b>Титан</b>    |                 |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 0               | 0,1339          | 0             | 0,669           | 0            | 0,669           | 0             | 0,268           | 0               | 0,293           | 0              | 0,335           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 200             | 0,1361          | -100          | 0,729           | -100         | 0,729           | 200           | 0,272           | 200             | 0,293           | 200            | 0,339           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 400             | 0,1382          | -50           | 0,733           | -50          | 0,733           | 400           | 0,276           | 400             | 0,293           | 400            | 0,343           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 600             | 0,1403          | -20           | 0,737           | -20          | 0,737           | 600           | 0,281           | 600             | 0,293           | 600            | 0,343           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 800             | 0,1424          | 0             | 0,741           | 0            | 0,741           | 800           | 0,285           | 800             | 0,293           | 800            | 0,343           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1000            | 0,1444          | 20            | 0,745           | 20           | 0,745           | 1000          | 0,289           | 1000            | 0,293           | 1000           | 0,343           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1200            | 0,1465          | 50            | 0,745           | 50           | 0,745           |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1400            | 0,1486          |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1600            | 0,1507          |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1800            | 0,1528          |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | <b>Ванадий</b>  |                 |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 0               | 0,1339          | 0             | 0,669           | 0            | 0,669           | 0             | 0,268           | 0               | 0,293           | 0              | 0,335           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 200             | 0,1361          | -100          | 0,729           | -100         | 0,729           | 200           | 0,272           | 200             | 0,293           | 200            | 0,339           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 400             | 0,1382          | -50           | 0,733           | -50          | 0,733           | 400           | 0,276           | 400             | 0,293           | 400            | 0,343           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 600             | 0,1403          | -20           | 0,737           | -20          | 0,737           | 600           | 0,281           | 600             | 0,293           | 600            | 0,343           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 800             | 0,1424          | 0             | 0,741           | 0            | 0,741           | 800           | 0,285           | 800             | 0,293           | 800            | 0,343           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1000            | 0,1444          | 20            | 0,745           | 20           | 0,745           | 1000          | 0,289           | 1000            | 0,293           | 1000           | 0,343           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1200            | 0,1465          | 50            | 0,745           | 50           | 0,745           |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1400            | 0,1486          |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1600            | 0,1507          |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1800            | 0,1528          |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | <b>Бериллий</b> |                 |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 0               | 0,1339          | 0             | 0,669           | 0            | 0,669           | 0             | 0,268           | 0               | 0,293           | 0              | 0,335           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 200             | 0,1361          | -100          | 0,729           | -100         | 0,729           | 200           | 0,272           | 200             | 0,293           | 200            | 0,339           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 400             | 0,1382          | -50           | 0,733           | -50          | 0,733           | 400           | 0,276           | 400             | 0,293           | 400            | 0,343           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 600             | 0,1403          | -20           | 0,737           | -20          | 0,737           | 600           | 0,281           | 600             | 0,293           | 600            | 0,343           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 800             | 0,1424          | 0             | 0,741           | 0            | 0,741           | 800           | 0,285           | 800             | 0,293           | 800            | 0,343           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1000            | 0,1444          | 20            | 0,745           | 20           | 0,745           | 1000          | 0,289           | 1000            | 0,293           | 1000           | 0,343           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1200            | 0,1465          | 50            | 0,745           | 50           | 0,745           |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1400            | 0,1486          |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1600            | 0,1507          |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1800            | 0,1528          |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | <b>Серебро</b>  |                 |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 0               | 0,1339          | 0             | 0,669           | 0            | 0,669           | 0             | 0,268           | 0               | 0,293           | 0              | 0,335           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 200             | 0,1361          | -100          | 0,729           | -100         | 0,729           | 200           | 0,272           | 200             | 0,293           | 200            | 0,339           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 400             | 0,1382          | -50           | 0,733           | -50          | 0,733           | 400           | 0,276           | 400             | 0,293           | 400            | 0,343           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 600             | 0,1403          | -20           | 0,737           | -20          | 0,737           | 600           | 0,281           | 600             | 0,293           | 600            | 0,343           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 800             | 0,1424          | 0             | 0,741           | 0            | 0,741           | 800           | 0,285           | 800             | 0,293           | 800            | 0,343           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1000            | 0,1444          | 20            | 0,745           | 20           | 0,745           | 1000          | 0,289           | 1000            | 0,293           | 1000           | 0,343           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1200            | 0,1465          | 50            | 0,745           | 50           | 0,745           |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1400            | 0,1486          |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1600            | 0,1507          |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1800            | 0,1528          |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | <b>Рубидий</b>  |                 |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 0               | 0,1339          | 0             | 0,669           | 0            | 0,669           | 0             | 0,268           | 0               | 0,293           | 0              | 0,335           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 200             | 0,1361          | -100          | 0,729           | -100         | 0,729           | 200           | 0,272           | 200             | 0,293           | 200            | 0,339           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 400             | 0,1382          | -50           | 0,733           | -50          | 0,733           | 400           | 0,276           | 400             | 0,293           | 400            | 0,343           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 600             | 0,1403          | -20           | 0,737           | -20          | 0,737           | 600           | 0,281           | 600             | 0,293           | 600            | 0,343           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 800             | 0,1424          | 0             | 0,741           | 0            | 0,741           | 800           | 0,285           | 800             | 0,293           | 800            | 0,343           |  |  |  |  |
|                 |                 |               |                 | 1000            | 0,1444          | 20            | 0,745           | 20           | 0,745           | 1000          | 0,289           | 1000            | 0,293           | 1000           | 0,343           |  |  |  |  |
|                 |                 |               | </              |                 |                 |               |                 |              |                 |               |                 |                 |                 |                |                 |  |  |  |  |

## Энтальпия различных металлов, кДж/кг

| Температура, °C | Al       | Co      | Cu      | Ni      | Sn      | Pb      | Zn      | Cr      |
|-----------------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 100             | 93,789   | 45,598  | 39,979  | 45,176  | 24,196  | 10,848  | 30,607  | 49,333  |
| 200             | 189,662  | 92,687  | 79,549  | 93,851  | 53,507  | 23,454  | 80,470  | 99,763  |
| 300             | 273,189  | 141,204 | 122,464 | 142,485 | 136,959 | 37,945  | 123,218 | 150,788 |
| 400             | 383,176  | 191,672 | 166,132 | 204,400 | 158,060 | 75,647  | 167,807 | 202,825 |
| 500             | 485,878  | 248,131 | 211,433 | 251,773 | 179,216 | 88,048  | 318,615 | 255,722 |
| 600             | 587,148  | 304,841 | 260,251 | 305,394 | 200,891 | 102,593 | 370,029 | 313,081 |
| 700             | 1017,824 | 366,726 | 309,195 | 356,967 | —       | 116,728 | 423,202 | 371,591 |
| 800             | 1073,462 | 434,757 | 358,055 | 408,766 | —       | 130,226 | 476,625 | 432,379 |
| 900             | 1216,123 | 503,609 | 398,165 | 462,574 | —       | —       | —       | 497,090 |
| 1000            | 1312,352 | 576,792 | 462,641 | 520,545 | —       | —       | —       | 564,255 |
| 1100            | —        | 654,116 | 727,666 | 576,192 | —       | —       | —       | 636,339 |
| 1200            | —        | 743,626 | 779,749 | 635,355 | —       | —       | —       | 713,632 |
| 1300            | —        | 831,176 | 830,577 | 696,030 | —       | —       | —       | 792,478 |

Рис. 13. Зависимость средней теплоемкости  $c$  металлов от температуры  $t$ :

| Кривая на рис. 13 | Металл                          | Температура $t$ , °C                                     |
|-------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------|
| I                 | V<br>Co<br>Ni<br>Cr             | 0—1400<br>100—1200<br>0—900<br>100—1500                  |
| II                | Cu<br>Zn                        | 0—1000<br>100—400                                        |
| III               | Mo<br>Nb<br>Rh                  | 0—1400<br>0—1400<br>0—1400                               |
| IV                | Cd<br>Sn<br>Ag                  | 10—250<br>0—230<br>100—900                               |
| V                 | Bi<br>Au<br>Ir<br>W<br>Pt<br>Pb | 0—250<br>0—1000<br>0—1500<br>0—1500<br>0—1500<br>100—300 |

Таблица III-8

Коэффициент температуропроводности металлов  $\alpha \cdot 10^3$ , м<sup>2</sup>/ч, в зависимости от температуры

| $t, ^\circ\text{C}$                                                                                                                                                                                                                                                                        | $\alpha$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\alpha$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\alpha$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\alpha$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\alpha$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\alpha$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\alpha$ |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|---------------------|----------|---------------------|----------|---------------------|----------|---------------------|----------|---------------------|----------|---------------------|----------|
| <div>Железо (99,9%)</div> <div>1 77,3</div> <div>100 64,2</div> <div>200 55,1</div> <div>300 47,7</div> <div>400 37,1</div> <div>500 29,6</div> <div>600 24,3</div> <div>700 15,8</div> <div>800 10,5</div> <div>900 7,5</div> <div>1000 5,5</div> <div>1100 4,5</div> <div>1200 3,5</div> |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |
| <div>Алюминий (99,0%)</div> <div>0 313</div> <div>100 306</div> <div>200 304</div> <div>300 302</div> <div>400 298</div> <div>500 296</div>                                                                                                                                                |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |
| <div>Калий</div> <div>1 560</div> <div>10 550</div> <div>20 540</div> <div>30 530</div> <div>40 522</div> <div>50 516</div> <div>60 510</div>                                                                                                                                              |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |
| <div>Золото (99,999%)</div> <div>0 447</div> <div>100 443,5</div> <div>200 438,5</div> <div>300 432,8</div> <div>400 431,1</div> <div>500 431,8</div>                                                                                                                                      |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |
| <div>Бериллий (99,5%)</div> <div>0 183,4</div> <div>100 179,9</div> <div>200 189,9</div>                                                                                                                                                                                                   |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |
| <div>Кобальт (97%)</div> <div>0 63,6</div> <div>100 84,73</div> <div>200 99,02</div>                                                                                                                                                                                                       |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |
| <div>Иридий</div> <div>0 74,8</div> <div>100 69,50</div> <div>200 66,48</div> <div>300 64,54</div>                                                                                                                                                                                         |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |
| <div>Висмут</div> <div>0 28,4</div> <div>50 24,4</div> <div>100 22,0</div>                                                                                                                                                                                                                 |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |
| <div>Вольфрам</div> <div>0 226</div> <div>200 189,9</div> <div>400 168,2</div> <div>600 146,1</div> <div>800 132,3</div> <div>1000 120,6</div> <div>1200 114,7</div>                                                                                                                       |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |
| <div>Магний (99,6%)</div> <div>0 305</div> <div>100 269</div> <div>200 252</div> <div>300 239</div> <div>400 237</div> <div>500 242</div>                                                                                                                                                  |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |
| <div>Кадмий</div> <div>0 177,7</div> <div>100 168</div> <div>200 168</div> <div>300 168</div> <div>400 165,5</div> <div>500 162,9</div>                                                                                                                                                    |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |
| <div>Молибден (99,84%)</div> <div>0 203</div> <div>100 197</div> <div>200 187</div> <div>300 182</div> <div>400 165</div>                                                                                                                                                                  |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |
| <div>Никель</div> <div>0 69,4</div> <div>100 64,0</div> <div>200 52,6</div> <div>300 45,6</div> <div>400 41,5</div> <div>500 38,8</div> <div>600 34,8</div> <div>700 31,8</div> <div>800 29,2</div>                                                                                        |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |
| <div>Медь (99,9%)</div> <div>0 405</div> <div>100 396</div> <div>200 382</div> <div>300 370</div> <div>400 360</div> <div>500 348</div> <div>600 339</div> <div>700 318</div> <div>800 292</div>                                                                                           |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |
| <div>Родий</div> <div>0 106</div> <div>100 99</div> <div>200 92</div> <div>300 81</div>                                                                                                                                                                                                    |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |
| <div>Платина (99,99%)</div> <div>0 89</div> <div>100 90,6</div> <div>200 90,6</div> <div>300 90,7</div> <div>400 91,3</div> <div>500 92,2</div> <div>600 94,5</div> <div>700 95,2</div> <div>800 96,3</div> <div>900 96,5</div> <div>1000 97,3</div> <div>1100 98,0</div>                  |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |
| <div>Серебро (99,9%)</div> <div>0 666</div> <div>100 610</div> <div>200 570</div> <div>300 544</div> <div>400 512</div> <div>500 507</div> <div>600 507</div> <div>700 507</div>                                                                                                           |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |
| <div>Свинец (99,993%)</div> <div>0 148</div> <div>100 138</div> <div>200 128</div> <div>300 119</div> <div>400 110</div>                                                                                                                                                                   |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |
| <div>Цинк (99,993%)</div> <div>0 167</div> <div>100 157</div> <div>200 148</div> <div>300 138</div> <div>400 128</div>                                                                                                                                                                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |                     |          |

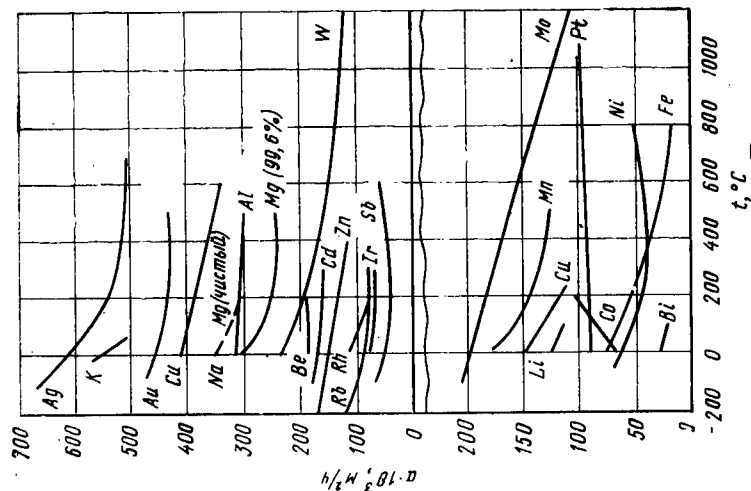


Рис. 14. Зависимость коэффициента температуропроводности  $\alpha$  металлов от температуры  $t$

Таблица III-9

Средний коэффициент линейного расширения металлов  $\beta \cdot 10^6$ ,  $1/^\circ\text{C}$ , в интервале температур от 0 до  $t, ^\circ\text{C}$ 

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\beta$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\beta$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\beta$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\beta$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\beta$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\beta$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\beta$ |
|---------------------|---------|---------------------|---------|---------------------|---------|---------------------|---------|---------------------|---------|---------------------|---------|---------------------|---------|
| <b>Алюминий</b>     |         | 1700                | 5,51    | <b>Кадмий</b>       |         | <b>Медь</b>         |         | <b>Ниобий</b>       |         | 1000                | 11,21   | 200                 | 9,6     |
|                     |         | 1900                | 5,60    |                     |         |                     |         |                     |         | 1200                | 11,62   | 300                 | 9,8     |
|                     |         | 2100                | 5,8     |                     |         |                     |         |                     |         | 1400                | 11,94   | 400                 | 10,0    |
| -100                | 19,5    | <b>Галлий</b>       |         | -50                 | 28,3    | 0                   | 16,7    | -100                | 6,92    | 1500                | 12,07   | 500                 | 10,2    |
| 0                   | 22,8    |                     |         | 0                   | 29,0    | 100                 | 17,06   | 0                   | 7,06    | <b>Свинец</b>       |         | 600                 | 10,3    |
| 100                 | 23,7    |                     |         | 50                  | 29,7    | 200                 | 17,42   | 100                 | 7,20    | <b>Титан</b>        |         |                     |         |
| 200                 | 24,5    |                     |         | 100                 | 30,4    | 400                 | 18,14   | 200                 | 7,35    |                     |         |                     |         |
| 300                 | 25,4    |                     |         | 150                 | 31,1    | 600                 | 18,86   | 400                 | 7,64    |                     |         |                     |         |
| 400                 | 26,2    | <b>Железо</b>       |         | 200                 | 31,8    | 800                 | 19,58   | <b>Олово</b>        |         | -250                | 25,1    | 0                   | 7,7     |
| 500                 | 27,1    |                     |         | 250                 | 32,4    | 1000                | 20,3    |                     |         | -200                | 26,5    | 100                 | 8,1     |
| 600                 | 27,9    |                     |         | <b>Кобальт</b>      |         | <b>Молибден</b>     |         | 0                   | 21,0    | -100                | 27,3    | 200                 | 8,5     |
| <b>Бериллий</b>     |         | 100                 | 12,15   |                     |         |                     |         | 50                  | 23,5    | 0                   | 28,3    | 400                 | 9,2     |
|                     |         | 200                 | 12,7    |                     |         |                     |         | 100                 | 26,2    | 100                 | 29,2    | 600                 | 10,0    |
|                     |         | 400                 | 13,8    |                     |         |                     |         | 150                 | 28,9    | 200                 | 30,3    | 700                 | 10,4    |
|                     |         | 600                 | 14,5    |                     |         |                     |         | 200                 | 31,6    | 300                 | 31,3    | <b>Хром</b>         |         |
| 0                   | 10,5    |                     |         | 100                 | 12,0    | 0                   | 5,1     | <b>Платина</b>      |         | <b>Серебро</b>      |         | -100                | 5,1     |
| 100                 | 11,7    |                     |         | 200                 | 12,5    | 100                 | 5,19    |                     |         |                     |         | 0                   | 5,88    |
| 200                 | 12,8    |                     |         | 300                 | 13,5    | 200                 | 5,28    |                     |         |                     |         | 100                 | 6,61    |
| 300                 | 13,7    |                     |         | 400                 | 13,9    | 300                 | 5,39    |                     |         |                     |         | 200                 | 7,28    |
| 400                 | 14,5    | <b>Золото</b>       |         | 500                 | 14,4    | 400                 | 5,48    |                     |         |                     |         | 400                 | 8,40    |
| 500                 | 15,2    |                     |         | <b>Магний</b>       |         | 500                 | 5,59    | 0                   | 8,95    |                     |         | 600                 | 9,22    |
| 600                 | 15,7    |                     |         |                     |         | 600                 | 5,68    | 100                 | 9,1     |                     |         | 700                 | 9,40    |
| <b>Висмут</b>       |         | 100                 | 14,32   |                     |         | 800                 | 5,87    | 200                 | 9,2     |                     |         | <b>Цинк</b>         |         |
|                     |         | 200                 | 14,51   |                     |         | <b>Никель</b>       |         | 400                 | 9,45    |                     |         | -100                | 22      |
|                     |         | 400                 | 14,96   |                     |         |                     |         | 600                 | 9,65    |                     |         | 0                   | 30      |
| 0                   | 15,4    |                     |         |                     |         |                     |         | 800                 | 9,9     |                     |         | 100                 | 32      |
| <b>Вольфрам</b>     |         | 600                 | 15,49   |                     |         |                     |         | 1000                | 10,15   |                     |         | 200                 | 34      |
|                     |         | 800                 | 16,12   |                     |         |                     |         | 1100                | 10,35   |                     |         | 300                 | 36      |
|                     |         | 1000                | 16,80   |                     |         |                     |         | <b>Родий</b>        |         |                     |         | 400                 | 38      |
|                     |         | <b>Иридий</b>       |         |                     |         |                     |         |                     |         | <b>Сурьма</b>       |         |                     |         |
| 0                   | 4,3     |                     |         |                     |         |                     |         |                     |         |                     |         |                     |         |
| 200                 | 4,44    |                     |         |                     |         |                     |         |                     |         |                     |         |                     |         |
| 400                 | 4,6     |                     |         |                     |         |                     |         |                     |         |                     |         |                     |         |
| 600                 | 4,72    |                     |         |                     |         |                     |         |                     |         |                     |         |                     |         |
| 800                 | 4,86    |                     |         |                     |         |                     |         |                     |         |                     |         |                     |         |
| 1000                | 5,01    |                     |         |                     |         |                     |         |                     |         |                     |         |                     |         |
| 1200                | 5,15    |                     |         |                     |         |                     |         |                     |         |                     |         |                     |         |
| 1500                | 5,35    |                     |         |                     |         |                     |         |                     |         |                     |         |                     |         |

Таблица III-10

Удельное электросопротивление металлов  $\rho, 10^6$ , Ом·см

| $t, ^\circ\text{C}$     | $\rho$ | $t, ^\circ\text{C}$  | $\rho$ | $t, ^\circ\text{C}$   | $\rho$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\rho$ | $t, ^\circ\text{C}$    | $\rho$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\rho$ |
|-------------------------|--------|----------------------|--------|-----------------------|--------|---------------------|--------|------------------------|--------|---------------------|--------|
| <b>Алюминий (99,7%)</b> |        | 0                    | 5,7    | <b>Висмут (99,9%)</b> |        | 1400                | 46,0   | 200                    | 21,5   | 600                 | 7,7    |
|                         |        | 100                  | 9,5    |                       |        | 1600                | 52,5   | 400                    | 42     | 800                 | 10,0   |
|                         |        | 200                  | 13,6   |                       |        | 2000                | 66,0   | 600                    | 69     | 1000                | 12,5   |
| -100                    | 1,46   | 400                  | 22,5   |                       |        | 2400                | 80,0   | 800                    | 101    | <b>Иридий</b>       |        |
| 0                       | 2,62   | 600                  | 33,5   | 0                     | 111    | 2800                | 95,2   | 1000                   | 117    |                     |        |
| 100                     | 3,86   | 700                  | 39,0   | 100                   | 156,5  | 3200                | 110    | 1200                   | 122    |                     |        |
| 200                     | 5,2    | <b>Ванадий (99%)</b> |        | 200                   | 214,5  | <b>Галлий</b>       |        | 1400                   | 126    |                     |        |
| 300                     | 6,5    |                      |        | 270                   | 267    |                     |        | <b>Золото (99,99%)</b> |        |                     |        |
| 400                     | 8,1    |                      |        | <b>Вольфрам</b>       |        |                     |        |                        |        |                     |        |
| 500                     | 9,6    |                      |        |                       |        |                     |        |                        |        |                     |        |
| 600                     | 10,9   |                      |        |                       |        |                     |        |                        |        |                     |        |
| <b>Бериллий (99,5%)</b> |        | 0                    | 19     |                       |        |                     |        |                        |        |                     |        |
|                         |        | 50                   | 21,8   |                       |        |                     |        |                        |        |                     |        |
|                         |        | 100                  | 25     |                       |        |                     |        |                        |        |                     |        |
|                         |        | 200                  | 30     |                       |        |                     |        |                        |        |                     |        |
| -200                    | 1,3    |                      |        |                       |        |                     |        |                        |        |                     |        |
| -100                    | 2,8    |                      |        |                       |        |                     |        |                        |        |                     |        |

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\rho_3$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\rho_3$ | $t, ^\circ\text{C}$  | $\rho_3$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\rho_3$ | $t, ^\circ\text{C}$              | $\rho_3$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\rho_3$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\rho_3$ |  |
|---------------------|----------|---------------------|----------|----------------------|----------|---------------------|----------|----------------------------------|----------|---------------------|----------|---------------------|----------|--|
| 50                  | 7,86     | 200                 | 2,38     | Платина<br>(99,999%) |          | Сурьма              |          | 800                              | 145      | 1600                | 124,1    |                     |          |  |
| 100                 | 9,29     | 400                 | 4,26     | 0                    | 11,75    | -200                | 8        | 950                              | 148      | 1800                | 146,0    |                     |          |  |
| 200                 | 12,1     | 600                 | 5,72     |                      |          |                     |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
| 250                 | 13,5     | 800                 | 7,38     |                      |          |                     |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
|                     |          | 1000                | 9,24     |                      |          |                     |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
| Калий               |          | Молибден            |          | 100                  | 13,64    | -100                | 22       | Хром<br>(электро-<br>литический) |          | Цинк<br>(99,993%)   |          |                     |          |  |
|                     |          |                     |          | 200                  | 17,35    |                     |          | 0                                | 36       |                     |          |                     |          |  |
|                     |          |                     |          | 300                  | 21,0     |                     |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
|                     |          |                     |          | 400                  | 24,4     |                     |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
|                     |          |                     |          | 500                  | 27,8     | 100                 | 51       |                                  |          | 0                   | 14,5     | -250                | 0,05     |  |
| -10                 | 5,78     | 0                   | 5,15     | Родий                |          | Титан               |          | 200                              | 21,9     | -200                | 1,30     |                     |          |  |
| 0                   | 6,1      | 200                 | 11       | 0                    | 4,3      | 0                   | 56       | 400                              | 31,1     | -100                | 3,31     |                     |          |  |
| 10                  | 6,4      | 400                 | 16,5     |                      |          |                     |          | 600                              | 42,1     | 0                   | 5,50     |                     |          |  |
| 30                  | 7,1      | 800                 | 28       |                      |          |                     |          | 800                              | 54,9     | 100                 | 7,9      |                     |          |  |
| 50                  | 7,7      | 1000                | 33       |                      |          |                     |          | 1000                             | 72,5     | 200                 | 10,4     |                     |          |  |
| Кобальт<br>(99,95%) |          | 1400                | 44       | 200                  | 8,08     | 100                 | 80       | 1200                             | 85,9     | 300                 | 13,2     |                     |          |  |
|                     |          | 1800                | 55       | 400                  | 11,87    |                     |          | 1400                             | 104,1    | 400                 | 16,0     |                     |          |  |
|                     |          | 2200                | 68       | 600                  | 15,65    |                     |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
|                     |          | 2400                | 74       | 800                  | 19,44    |                     |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
|                     |          | 2500                | 78       | 1000                 | 23,22    | Рубидий<br>(чистый) |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
| 0                   | 5,5      |                     |          | 0                    | 11,4     |                     |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
| 100                 | 10,1     | Натрий              |          |                      |          | 10                  |          | 12,0                             |          |                     |          |                     |          |  |
| 200                 | 14,7     | -200                | 0,75     |                      |          | 20                  |          | 12,6                             |          |                     |          |                     |          |  |
| 300                 | 19,5     | -100                | 2,30     |                      |          | 30                  |          | 13,2                             |          |                     |          |                     |          |  |
| 400                 | 25,5     | 0                   | 4,26     |                      |          |                     |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
| Литий               |          | 50                  | 5,28     |                      |          |                     |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
|                     |          | 75                  | 5,85     |                      |          |                     |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
| Никель<br>(99,98%)  |          | Свинец              |          | -250                 |          | 0,5                 |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
| -200                | 0,86     |                     |          | 0                    | 6,5      | -200                | 4,0      |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
| -100                | 4,74     |                     |          |                      |          |                     |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
| 0                   | 8,65     |                     |          |                      |          |                     |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
| 50                  | 10,6     |                     |          |                      |          |                     |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
| 100                 | 12,3     | 0                   | 6,5      | 100                  | 10,8     | -100                | 11,5     |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
| 150                 | 14,0     | 200                 | 16,2     |                      |          |                     |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
|                     |          | 400                 | 31,7     |                      |          |                     |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
|                     |          | 600                 | 39,2     |                      |          |                     |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
| Магний              |          | 800                 | 44,2     | 1000                 | 49,1     | -250                | 0,0135   |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
| 0                   | 4,2      |                     |          |                      |          |                     |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
| 100                 | 5,77     |                     |          |                      |          |                     |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
| 200                 | 7,57     |                     |          |                      |          |                     |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
| 400                 | 12,05    |                     |          | Ниобий               |          | Серебро<br>(99,9%)  |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
| 600                 | 17,3     | 0                   | 14       | 100                  | 17,5     | -200                | 0,300    |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
|                     |          | 200                 | 21       |                      |          |                     |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
|                     |          |                     |          |                      |          |                     |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
|                     |          |                     |          |                      |          |                     |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
| Марганец            |          | Олово<br>(99,99%)   |          | 0                    | 1,50     | -100                | 0,893    |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
| 0                   | 255      |                     |          |                      |          |                     |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
| 200                 | 280      |                     |          |                      |          |                     |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
| 400                 | 300      |                     |          |                      |          |                     |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
| 600                 | 310      |                     |          | Медь<br>(99,999%)    |          | 100                 | 2,12     |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
| 800                 | 150      |                     |          | 0                    | 11       | 200                 |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
| 1000                | 130      |                     |          |                      |          |                     |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
| 1200                | 70       |                     |          |                      |          |                     |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
|                     |          | 50                  | 13,8     |                      |          |                     |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
|                     |          | 100                 | 16,5     | 150                  | 19,2     | 400                 | 4,05     |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
|                     |          | 200                 | 22       |                      |          |                     |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
|                     |          |                     |          |                      |          |                     |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
|                     |          |                     |          |                      |          |                     |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
| 0                   | 1,55     |                     |          | 100                  | 2,22     | 200                 | 7,65     |                                  |          |                     |          |                     |          |  |
| 100                 | 2,22     |                     |          |                      |          |                     |          |                                  |          |                     |          |                     |          |  |

Рис. 15. Зависимость удельного электросопротивления  $\rho_3$  (мкОм·см) металлов от температуры  $t$ :

I — W от 0 до 3400°C, Zn от -250 до 400°C; II — Be от -200 до 700°C, Cd от -50 до 250°C, K от -10 до 50°C; III — Ir от 0 до 600°C, Mg от 0 до 600°C; IV — Rb от 0 до 30°C, Sn от 0 до 200°C

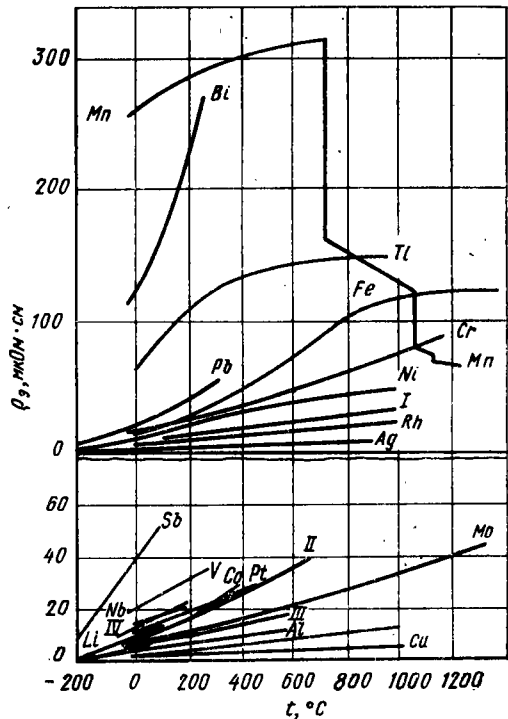


Рис. 15. Зависимость удельного электросопротивления  $\rho_3$  (мкОм·см) металлов от температуры  $t$ :

I — W от 0 до 3400°C, Zn от -250 до 400°C; II — Be от -200 до 700°C, Cd от -50 до 250°C, K от -10 до 50°C; III — Ir от 0 до 600°C, Mg от 0 до 600°C; IV — Rb от 0 до 30°C, Sn от 0 до 200°C

Таблица III-11

Удельное электросопротивление  $\rho_s$  некоторых сплавов при различных температурах

| Сталь легированная конструкционная:        | $\rho_s \cdot 10^6$ , Ом·см              |
|--------------------------------------------|------------------------------------------|
| Инвар (64% Fe, 36% Ni и др.) . . . . .     | 75 (0)                                   |
| Константан (60% Cu, 40% Ni) . . . . .      | 49,0 (18); 49,1 (100)                    |
| Латунь (70% Cu, 30% Zn) . . . . .          | 4,1 (—160); 6,6 (17)                     |
| Манганин (84% Cu, 4% Ni, 12% Mn) . . . . . | 43,13 (—160); 44,50 (18);<br>42,11 (100) |
| Нихром . . . . .                           | 110 (20)                                 |
| Нейзильбер:                                |                                          |
| 62% Cu, 15% Ni, 22% Zn . . . . .           | 26,6 (0); 27,6 (100)                     |
| 60% Cu, 14% Ni, 24% Zn, 2% W . . . . .     | 32,5 (—160); 34,4 (18)                   |
| Платиноид составов:                        |                                          |
| 90% Pt; 10% Rh . . . . .                   | 21,1(0)                                  |
| 67% Pt; 33% Ag . . . . .                   | 24,2 (0)                                 |

Примечание. В скобках дана температура, °С, при которой приведено удельное электросопротивление.

Таблица III-12

Механические свойства важнейших металлов

| Название металла и обозначение модификации | $\sigma_B$ , МН/м <sup>2</sup> | $\sigma_{пц}$ , МН/м <sup>2</sup> | $\sigma_T$ , МН/м <sup>2</sup> | $\delta$ , % | $\psi$ , % | $E$ , МН/м <sup>2</sup> | НВ    |
|--------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--------------|------------|-------------------------|-------|
| Алюминий (Al) . . . . .                    | 80—110                         | 30                                | 30—70                          | 40           | 85         | 72000                   | 20—35 |
| Бериллий ( $\alpha$ -Be) . . . . .         | 140                            | 60                                | —                              | —            | —          | 300000                  | 140   |
| Вольфрам ( $\beta$ -W) . . . . .           | 1200—1400                      | —                                 | 750                            | —            | —          | 420000                  | 350   |
| Железо ( $\alpha$ -Fe) . . . . .           | 250—330                        | 120                               | 125                            | 25—55        | 70—85      | 210000                  | 50    |
| Кадмий ( $\alpha$ -Cd) . . . . .           | 62                             | 3                                 | 10                             | 20           | 50         | 530000                  | 20    |
| Кобальт ( $\alpha$ -Co) . . . . .          | 240                            | —                                 | —                              | 5            | —          | 207500                  | 125   |
| Кремний (Si) . . . . .                     | —                              | —                                 | —                              | —            | —          | 114500                  | 240   |
| Магний (Mg) . . . . .                      | 170—200                        | 12                                | 20—60                          | 15           | 20         | 43600                   | 25    |
| Марганец:                                  |                                |                                   |                                |              |            |                         |       |
| $\alpha$ -Mn                               | }                              | Хрупкий                           |                                |              |            | 201600                  | 210   |
| $\beta$ -Mn                                |                                |                                   |                                |              |            |                         |       |
| Медь (Cu) . . . . .                        | 220                            | 15                                | 60—80                          | 60           | 75         | 132000                  | 35    |
| Молибден (Mo) . . . . .                    | 700                            | —                                 | —                              | 30           | —          | 330000                  | 125   |
| Никель ( $\alpha$ -Ni) . . . . .           | 400—500                        | 80                                | 120                            | 40           | 70         | 205000                  | 60—80 |
| Ниобий (Nb) . . . . .                      | 340                            | —                                 | —                              | —            | 30         | —                       | 250   |
| Олово (белое) ( $\beta$ -Sn) . . . . .     | 20—40                          | 1,5                               | —                              | 40           | 75         | 55000                   | 5     |
| Свинец (Pb) . . . . .                      | 18                             | 2,5                               | 5—10                           | 50           | 100        | 17000                   | 4—6   |
| Титан ( $\alpha$ -Ti) . . . . .            | 600                            | —                                 | 440                            | 28           | —          | 105000                  | 230   |
| Хром ( $\alpha$ -Cr) . . . . .             | Хрупкий                        |                                   |                                |              |            | 252000                  | 220   |
| Цирконий ( $\alpha$ -Zr) . . . . .         | 950 (проволока)                | —                                 | —                              | —            | —          | 70000                   | 82    |
| Цинк (Zn) . . . . .                        | 110—150                        | —                                 | 90—100                         | 5—20         | —          | 94000                   | 30—42 |

Т а б л и ц а П И - 13

## Основные характеристики материалов для нагревательных элементов

| Наименование материала или марка, химический состав                              | Область применения                                                              | Плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | Удельное электрическое сопротивление $\rho_s$ при $t$ , °С, Ом·мм <sup>2</sup> /м | Коэффициент линейного расширения $\beta \cdot 10^6$ средний в интервале $20 \div t$ °С, $1/^\circ\text{C}$ |
|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Сталь                                                                            | Нагреватели низкотемпературных печей, термоэлектроды                            | 7,86                                  | $0,12 \div 0,15 + 7 \div 10 \cdot 10^{-3} t$                                      | 11,7                                                                                                       |
| Сталь Х25Н20С2 (ЭИ283), 23—27% Сг; 17—20% Ni; 2—3% Si; 50—53% Fe                 | Жароупорные детали, нагревательные элементы печей, до 800°С                     | 7,84                                  | $0,92 + 38 \cdot 10^{-5} t$                                                       | 16,3                                                                                                       |
| Сталь Х23Н18 (ЭИ417), 22—25% Сг; 17—20% Ni; 53—57% Fe                            | Жароупорные детали, нагревательные элементы печей, до 800°С                     | 7,8                                   | $0,9 + 40 \cdot 10^{-5} t$                                                        | 17,0                                                                                                       |
| Сталь ЭИ595 (сплав модифицирован), 21,5—23,5% Сг; 4,3—4,8% Al; <0,5% С           | Нагревательные элементы печей, до 1150°С                                        | 7,27                                  | $1,4 + 5 \cdot 10^{-5} t$                                                         | 17,4                                                                                                       |
| Сталь ЭИ595 (сплав модифицирован), Сг; 30—35% Ni; 45—50 Fe                       | Нагревательные элементы печей, до 1250°С                                        | 7,19                                  | $1,4 + 5 \cdot 10^{-5} t$                                                         | —                                                                                                          |
| Богатый железом нихром 20/35, 15—20% Сг; 30—35% Ni; 45—50 Fe                     | Жароупорные детали, нагревательные элементы печей, до 900°С, и бытовых приборов | 7,95                                  | $1,06 + 26 \cdot 10^{-5} t$                                                       | 16,0                                                                                                       |
| Нихром Х15Н60 (ЭХН60), 15—18% Сг; 55—61% Ni; 22—27% Fe; <0,15% С                 | Нагревательные элементы печей, до 950°С                                         | 8,2 ÷ 8,35                            | $1,09 \div 1,12 + 14 \cdot 10^{-5} t$                                             | 13,0                                                                                                       |
| Нихром Х20Н80 (ЭХН80), 20—23% Сг; 75—78% Ni; 1,5% Fe; <0,15% С                   | Нагревательные элементы печей, до 1100°С                                        | 8,4                                   | $1,07 \div 1,12 + 8,5 \cdot 10^{-5} t$                                            | 14,0                                                                                                       |
| Нихром Х20Н80Т, 19—21% Сг; 75—78% Ni; 2—3% Ti; <0,08% С                          | То же                                                                           | 8,4                                   | $1,07 \div 1,12 (20^\circ\text{C})$                                               | —                                                                                                          |
| Нихром Х20Н80 ТЗ, <2,5% Fe; 0,5% Mn; 19—23% Сг; 69—75 Ni; 2—2,9% Ti; 0,4—1,1% Al | Нагревательные элементы печей, до 1150°С                                        | 8,4                                   | $1,27 + 4 \cdot 10^{-5} t$                                                        | —                                                                                                          |
| Фехраль Х13Ю4 (ЭИ60), 12—15% Сг; 3,5—5,5% Al; 80—83% Fe; <0,15% С                | Нагревательные элементы печей, до 700°С, и бытовых приборов                     | 7,4                                   | $1,26 + 6 \cdot 10^{-5} t$                                                        | —                                                                                                          |
| Сплав для бытовых приборов, 12—15% Сг; 2,5—3,0% Al; 0,12% С; ост. Fe             | Нагревательные элементы печей, до 1200—1250°С                                   | 7,1—7,25                              | $1,3 \div 1,45 + 6 \div 9 \cdot 10^{-5} t$                                        | 13<br>(20—200°С)<br>14—15<br>(20—200°С)<br>15,5<br>(20—200°С)                                              |
| Металпир, 30% Сг; 5% Al; <0,1% С; ост. Fe                                        | То же                                                                           | 7,1                                   | $1,4 + 4 \cdot 10^{-5} t$                                                         | —                                                                                                          |

| Наименование материала или марка, химический состав | Область применения                                                           | Плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | Удельное электрическое сопротивление $\rho_s$ при $t$ , °С, Ом·мм <sup>2</sup> /м                            | Коэффициент линейного расширения $\beta \cdot 10^6$ средний в интервале $20 \pm t$ °С, 1/°С |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| Платина                                             | Нагревательные элементы лабораторных печей на 1100—1300°С                    | 21,46                                 | $0,98 + 3,86 \cdot 10^{-3} t - 5,68 \cdot 10^{-5} t^2$<br>погрешность 0,5%<br>$0 < t \leq 660^\circ\text{C}$ | $8,95 + 1,22 \cdot 10^{-3} t$ ,<br>погрешность 0,5%;<br>$0 < t < 1100^\circ\text{C}$        |
| Молибден                                            | Нагревательные элементы вакуумных, до 1650°С, и водородных, до 2000°С, печей | 10,2                                  | $0,515 + 2,85 \cdot 10^{-3} t + 2,06 \cdot 10^{-5} t^2$<br>погрешность 3%<br>$0 < t < 2500^\circ\text{C}$    | $5,1 + 9,65 \cdot 10^{-4} t$ ,<br>погрешность 2%;<br>$0 < t < 2100^\circ\text{C}$           |
| Вольфрам                                            | Нагревательные элементы вакуумных и водородных печей, до 3000°С              | 19,34                                 | $2,6 \cdot 10^{-3} t + 1,74 \cdot 10^{-5} t^2$ ,<br>погрешность 3%<br>$500 < t < 3200^\circ\text{C}$         | $4,3 + 7,1 \cdot 10^{-4} t$ ,<br>погрешность 3%;<br>$0 < t < 2100^\circ\text{C}$            |
| Тантал                                              | Нагревательные элементы вакуумных и водородных печей, до 2500°С              | 16,6                                  | $0,15 + 4 \cdot 10^{-3} t$                                                                                   | 6,5<br>(0—100°С)                                                                            |
| Глобар (SiC)                                        | Нагревательные элементы печей, на 1350—1400°С                                | 2,3*                                  | 800—1900                                                                                                     | —                                                                                           |
| Силит (SiC)                                         | То же                                                                        | 2,2*                                  | 800—1900                                                                                                     | 5,6                                                                                         |
| Графит                                              | Нагревательные элементы печей, на 2000—3000°С                                | 2,2*                                  | 8—13                                                                                                         | —                                                                                           |
| Уголь                                               | То же                                                                        | 1,6*                                  | 40—60                                                                                                        | —                                                                                           |
| Криптол (C)                                         | Нагревательные элементы лабораторных печей, на 1400—1800°С                   | 1,0—1,25*                             | 600—2000                                                                                                     | —                                                                                           |

\* Плотность дана с учетом пористости.

## ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛЕЙ И ЧУГУНОВ

### КЛАССИФИКАЦИЯ СТАЛЕЙ

В зависимости от химического состава стали делят на углеродистые и легированные.

Углеродистые стали (рис. 16) по содержанию углерода делят на малоуглеродистые — не более 0,32% С, среднеуглеродистые — от ~0,3 до 0,65% С и высокоуглеродистые — от 0,68 до 1,5% С.

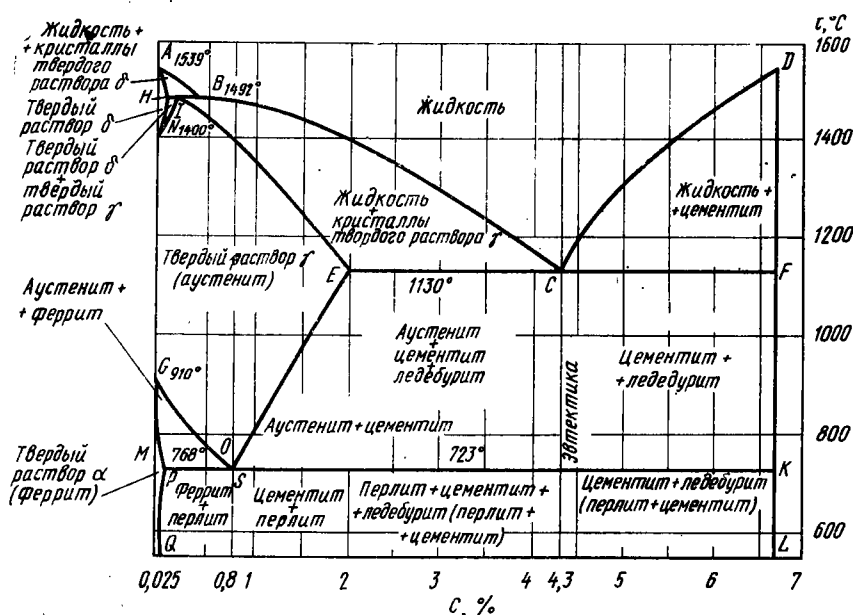


Рис. 16. Диаграмма состояния Fe—C

Легированные стали принято делить на низколегированные (суммарное содержание легирующих элементов не более ~4%); среднелегированные (от ~4—5 до 8—10%) и высоколегированные (от ~10 до 50%).

По назначению углеродистые стали делятся на конструкционные и инструментальные. Конструкционные углеродистые стали в свою очередь делят на строительные стали (главным образом низкоуглеродистые) и машиностроительные (средне- и низкоуглеродистые). Инструментальные углеродистые стали (высокоуглеродистые) подразделяются на стали для режущего, мерительного и штамповочного инструментов.

Легированные стали по назначению делятся на конструкционные, инструментальные и стали с особыми свойствами.

Стали с особыми свойствами в зависимости от основных свойств подразделяют на:

1) коррозионностойкие (нержавеющие), к которым относятся стали, характеризующиеся стойкостью против электрохимической коррозии (атмосферной, почвенной, щелочной, кислотной и пр.);

2) жаростойкие (окалиностойкие), к которым относятся стали, обладающие стойкостью против химического разрушения поверхности в газовых средах при температурах выше 550°C, работающие в ненагруженном или слабонагруженном состоянии;

3) жаропрочные стали, к которым относятся стали, работающие в нагруженном состоянии при высоких температурах в течение определенного времени и характеризующиеся при этом достаточной окалиностойкостью;

4) стали и сплавы с высоким омическим сопротивлением и другими специальными свойствами.

В зависимости от технологии обработки конструкционные низкоуглеродистые (машиностроительные и легированные стали, содержащие  $\geq 0,35\%$  С) принято называть цементуемыми, а среднеуглеродистые — улучшаемыми, т. е. подвергаемыми закалке с высоким отпуском.

По качеству все стали делят на стали обыкновенного качества, качественные и высококачественные.

## ОБОЗНАЧЕНИЯ МАРОК СТАЛЕЙ

Углеродистую сталь обыкновенного качества в зависимости от назначения, в соответствии с ГОСТ 380—71, подразделяют на три группы: А — сталь, поставляемую по механическим свойствам; Б — поставляемую по химическому составу; В — поставляемую по механическим свойствам и химическому составу. Буквы Б и В ставят перед маркой стали, группу А в обозначении марки стали не указывают.

Марки сталей обозначают буквами Ст, означающими «сталь», и цифрами от 0 до 6. Цифры представляют собой условный номер марки стали в зависимости от химического состава и механических свойств стали.

Для обозначения степени раскисления к обозначению марки стали после номера марки добавляют индексы: кп — кипящая, пс — полуспокойная, сп — спокойная. В том случае, когда не указана степень раскисления, в обозначении марки стали ничего не ставят либо ставят тире для отделения категории стали.

В зависимости от нормируемых показателей (механических свойств и (или) химического состава) сталь каждой группы подразделяют на категории: группы А — 1, 2, 3; группы Б — 1, 2; группы В — 1, 2, 3, 4, 5, 6. Эти цифры ставятся в конце обозначения марки стали. Первую категорию в обозначении марки стали не указывают (например, Ст3, БСт3, ВСт3сп, Ст3—2).

Для обозначения полуспокойной стали с повышенным содержанием марганца к обозначению марки стали после номера марки ставят букву Г, например Ст3Гпс.

Марки конструкционной углеродистой качественной стали (по ГОСТ 1050—60) обозначают: 05кп, 05, 08кп, 10, 15, 20, 30, 35 и т. д. (через 5 единиц) до 70; при повышенном содержании марганца справа от цифры ставится буква Г—50Г. Двухзначное число здесь — среднее содержание углерода в сотых долях процента, индекс «кп» — означает кипящую сталь, «пс» — полуспокойную.

Марки качественной углеродистой инструментальной стали (по ГОСТ 1435—54) обозначают У7, У8 и т. д. до У12 (У — углеродистая, цифра — среднее содержание углерода в десятых долях процента).

В обозначении марок высококачественных сталей в конце добавляют букву А (У8А).

В марках легированных сталей для легирующих элементов приняты следующие буквенные обозначения: алюминий — Ю, бор — Р, вана-

дий — Ф; вольфрам — В, кобальт — К; кремний — С; марганец — Г; медь — Д, молибден — М, никель — Н, ниобий — Б, титан — Т, фосфор — П, хром — Х, цирконий Ц. Марку легированной стали любой из групп составляют из букв, соответствующих обозначениям легирующих элементов. При этом, если содержание элемента превышает 1,5%, то справа от соответствующей ему буквы ставят цифру примерного его содержания в процентах.

Особо высококачественную сталь обозначают буквой Ш, через тире в конце наименования марки, например качественная 30ХГС; высококачественная 30ХГСА; особо высококачественная 30ХГС—Ш, 30ХГСА—Ш.

В начале марки, слева от букв, указывают среднее содержание углерода: для конструкционных сталей в сотых долях процента — двузначная цифра, для инструментальных, средне- и высоколегированных сталей с особыми свойствами в десятых долях процента — однозначная цифра. В последнем случае при очень малом содержании углерода ( $<0,08\%$ ) ставится цифра 0.

В марках некоторых инструментальных легированных сталей для режущего инструмента, в которых содержание углерода обычно близко к 1%, цифру не ставят.

Для некоторых групп легированных сталей обозначения марок отличаются от приведенных выше:

- А — автоматные стали;
- Р — быстрорежущие инструментальные стали;
- Ш — шарикоподшипниковые стали;
- Э — электротехнические стали;
- Е — стали для постоянных магнитов.

Эти буквы ставят в начале марки, за ними следуют буквы, цифры или буквы и цифры, имеющие в каждой группе свое условное значение.

Осваиваемые экспериментальные марки сталей обозначают буквами ЭИ и ЭП, за которыми следует число порядкового номера стали.

Если в конце обозначения имеется буква А, то данная марка стали относится к высококачественным сталям, более чистым по фосфору и сере, обладающим более высокими техническими свойствами. Л в конце марки обозначает сталь для отливок. Например, марка стали 1Х14Н14В2М (ЭИ257) означает, что содержание элементов в стали должно соответствовать следующему составу: 0,1% С; 14% Сг; 14% Ni; 2% W; 1% Мо.

В действительности химический анализ стали таков: 0,1% С; 15,3% Сг; 12,3% Ni; 2,76% W; 0,72% Мо; 0,43% Мп; 0,59% Si.

В соответствии с ГОСТ 5632—61, высоколегированные стали подразделяют на классы по виду структуры в зависимости от основной структуры, получаемой при охлаждении на воздухе после высокотемпературного нагрева, как показано ниже.

| Класс стали <sup>1,2</sup>     | Характеристика                                                          |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Мартенситный . . . . .         | Стали с основной структурой мартенсита                                  |
| Мартенсито-ферритный . . . . . | Стали, содержащие в структуре, кроме мартенсита, не менее 5—10% феррита |

<sup>1</sup> При изменении скорости охлаждения принятые классы по структуре становятся условными. Так, при увеличении скорости охлаждения в стали перлитного класса можно получить мартенситную структуру и, наоборот, при замедленной скорости в стали мартенситного класса можно получить перлитную структуру.

<sup>2</sup> Сталь карбидного класса может иметь перлитную, мартенситную, аустенитную структуру.

|                                  |                                                                                                       |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ферритный . . . . .              | Стали, имеющие структуру феррита                                                                      |
| Аустенито-мартенситный . . . . . | Стали, имеющие структуру аустенита и мартенсита, количество которых можно изменить в широких пределах |
| Аустенито-ферритный * . . . . .  | Стали со структурой аустенита и феррита (феррита более 10%)                                           |
| Аустенитный . . . . .            | Стали, имеющие структуру аустенита                                                                    |

### Красочная маркировка стали разных марок

Наименование группы и марки стали

Цвет окраски

#### ГОСТ 380—71

Сталь углеродистая обыкновенного качества, независимо от группы стали и степени раскисления:

|               |                   |
|---------------|-------------------|
| Ст0 . . . . . | Красный + зеленый |
| Ст1 . . . . . | Белый + черный    |
| Ст2 . . . . . | Желтый            |
| Ст3 . . . . . | Красный           |
| Ст4 . . . . . | Черный            |
| Ст5 . . . . . | Зеленый           |
| Ст6 . . . . . | Синий             |

#### ГОСТ 1050—60

Сталь углеродистая качественная конструкционная:

|                   |                      |
|-------------------|----------------------|
| 08—20 . . . . .   | Белый                |
| 25—40 . . . . .   | Белый + желтый       |
| 45—85 . . . . .   | Белый + коричневый   |
| 15Г—40Г . . . . . | Коричневый           |
| 50Г—70Г . . . . . | Коричневый + зеленый |

#### ГОСТ 4543—71

Сталь легированная конструкционная:

|                                                                 |                      |
|-----------------------------------------------------------------|----------------------|
| хромистая . . . . .                                             | Зеленый + желтый     |
| марганцовистая . . . . .                                        | Коричневый + синий   |
| хромомарганцевая . . . . .                                      | Синий + черный       |
| хромокремнистая . . . . .                                       | Синий + красный      |
| хромомолибденовая и хромо-<br>молибденованадиевая . . . . .     | Зеленый + фиолетовый |
| хромованадиевая . . . . .                                       | Зеленый + черный     |
| никелемолибденовая . . . . .                                    | Желтый + фиолетовый  |
| хромоникелевая и хромоникеле-<br>вая с бором . . . . .          | Желтый + черный      |
| хромокремнемарганцевая . . . . .                                | Красный + фиолетовый |
| хромоникелемолибденовая . . . . .                               | Фиолетовый + черный  |
| хромоалюминиевая и хромо-<br>алюминиевая с молибденом . . . . . | Алюминиевый          |

На продукцию из высоколегированной, коррозионностойкой, инструментальной быстрорежущей и других групп сталей наносят дополнительную цветную маркировку в соответствии с требованиями стандартов на конкретные виды продукции и, по требованию потребителя, цвета окраски устанавливают соглашением сторон.

Заводом-изготовителем либо выполняется окраска стали крупных размеров по торцам, а мелких — по концам прутков, либо на поверхность изделий наносится красочная маркировка через определенные интервалы.

### ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ СТАЛЕЙ

Общие количественные закономерности изменения коэффициента теплопроводности сплавов в зависимости от концентрации компонентов в настоящее время еще не определены. Известно, что при добавлении

другого компонента коэффициент теплопроводности, как правило, сначала резко уменьшается, а затем изменяется значительно слабее (рис. 17—19).

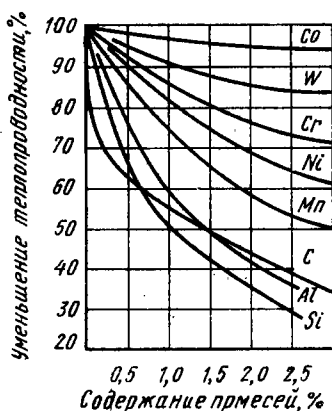


Рис. 17. Влияние примесей на теплопроводность железа

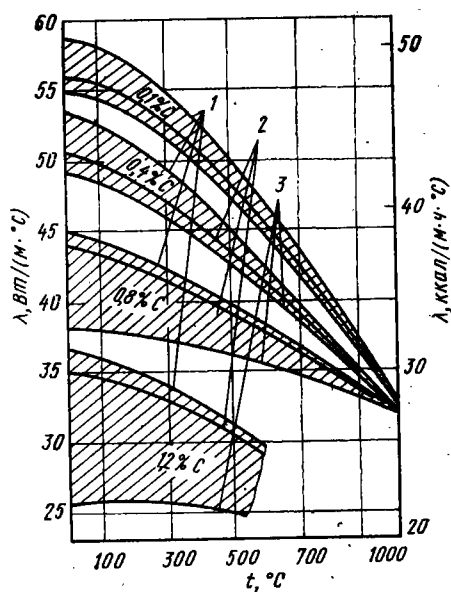


Рис. 19. Зависимость коэффициента теплопроводности сталей с различным содержанием углерода от температуры  $t$  и способа обработки: 1 — кованая; 2 — отожженная при  $200^{\circ}\text{C}$ ; 3 — закаленная в масле от  $900^{\circ}\text{C}$

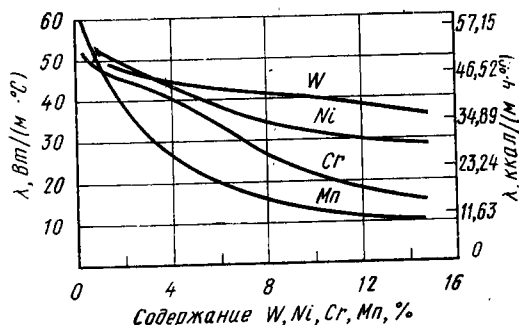


Рис. 18. Зависимость коэффициента теплопроводности стали от содержания легирующих W, Ni, Cr, Mn

Теплопроводность электролитического (очень чистого) железа  $94,4 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$ . Теплопроводность железа Армко ( $0,023\% \text{ C}$ ,  $0,007\% \text{ Si}$ ,  $0,025\% \text{ Mn}$ ,  $0,007\% \text{ P}$  и  $0,02\% \text{ S}$ ) —  $78,4 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$ .

Влияние содержания примесей на теплопроводность железа видно на рис. 17.

Коэффициент теплопроводности значительно понижается при добавлении углерода к железу (до  $0,2\%$ ); дальнейшее добавление углерода такого эффекта не дает (табл. IV-I).

Таблица IV-1

Теплопроводность железа с различным содержанием углерода в зависимости от температуры,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$

| Сплав                                 | Температура, $^{\circ}\text{C}$ |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------------------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|
|                                       | 18                              | 100  | 200  | 300  | 400  | 500  | 600  |
| Железо чистое . . . . .               | 67,6                            | 63,4 | —    | —    | —    | —    | —    |
| Сталь ( $0,1\% \text{ C}$ ) . . . . . | —                               | 54,6 | —    | 50,0 | —    | —    | 37,2 |
| Сталь ( $0,6\% \text{ C}$ ) . . . . . | —                               | 41,9 | —    | 33,7 | —    | —    | 29,1 |
| Сталь ( $1\% \text{ C}$ ) . . . . .   | 45,4                            | 43,4 | —    | —    | —    | —    | —    |
| Сталь ( $1,5\% \text{ C}$ ) . . . . . | —                               | 36,1 | —    | 33,7 | —    | —    | 29,1 |
| Железо сварочное шведское . . . . .   | —                               | 55,4 | 52,0 | 48,5 | 45,0 | 39,8 | —    |

Добавки марганца к сталям, содержащим  $>0,15\%$  С, оказывают небольшое влияние на теплопроводность. Сталь 08, содержащая 0,05—0,12% С и 0,25—0,50% Мп, характеризуется теплопроводностью  $\lambda = 53,2$ , а сталь 10Г2 с таким же содержанием углерода и 1,2—1,6% Мп характеризуется теплопроводностью  $\lambda = 49,6$  Вт/(м·°С). Таким образом, увеличение содержания марганца в 3—5 раз понижает теплопроводность на 12%. Значительное содержание марганца существенно влияет на коэффициент теплопроводности, который изменяется следующим образом:

|                                         |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Содержание марганца в стали, %          | 0,11 | 0,31 | 0,60 | 1,10 | 1,60 | 3,00 | 5,00 | 8,80 |
| Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С) | 63,1 | 54,4 | 49,0 | 47,9 | 41,4 | 30,2 | 21,4 | 17,1 |

Влияние других примесей на теплопроводность сталей показано на рис. 18.

Теплопроводность зависит не только от чистоты металла, но и от величины зерна. Для переплавленного в вакууме электролитического железа, охлажденного с различной скоростью:

|                                                       |      |      |      |
|-------------------------------------------------------|------|------|------|
| Среднее число зерен на 1 см одного из того же образца | 11   | 175  | 644  |
| Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·°С)                | 93,0 | 90,0 | 84,0 |

Теплопроводность катаных и литых сталей различается незначительно, с некоторой тенденцией к увеличению для катаных сталей в области температуры до 600°С.

Различие в теплопроводности как по высоте, так и по сечению слитков литой стали также невелико: порядка 10—15%.

Теплопроводность слитков кипящей и спокойной стали, близких по химическому составу, практически не различается.

Термическая обработка стали, как правило, приводит к уменьшению коэффициента теплопроводности.

Изменение теплопроводности сталей с различным содержанием углерода в зависимости от температуры нагрева и обработки видно из рис. 19. При 800—900°С теплопроводность сталей большинства марок составляет 30—33 Вт/(м·°С).

Теплопроводность окалины, образующейся на поверхности литой стали, в зависимости от температуры следующая:

|                                        |      |      |      |      |
|----------------------------------------|------|------|------|------|
| Температура, °С                        | 900  | 1000 | 1100 | 1200 |
| Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·°С) | 1,45 | 1,63 | 1,86 | 2,10 |

Таблица IV-2

Свойства структурных составляющих стали и чугуна

| Свойства                                                      | Структурные составляющие |        |          |        |        |
|---------------------------------------------------------------|--------------------------|--------|----------|--------|--------|
|                                                               | аустенит                 | феррит | цементит | перлит | графит |
| Удельная теплоемкость $c$ , кДж/(кг·°С), при температуре, °С: |                          |        |          |        |        |
| 100                                                           | 0,50                     | 0,4635 | 0,5987   | —      | 0,8474 |
| 200                                                           | —                        | 0,4861 | 0,6229   | —      | 0,9412 |
| 300                                                           | —                        | 0,5087 | 0,6238   | —      | 1,0329 |
| 400                                                           | —                        | 0,5338 | 0,6301   | —      | 1,1183 |

| Свойства                                                                              | Структурные составляющие |           |          |           |         |
|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-----------|----------|-----------|---------|
|                                                                                       | аустенит                 | феррит    | цементит | перлит    | графит  |
| 500 . . . . .                                                                         | —                        | 0,5598    | 0,5543   | —         | 1,1995  |
| 600 . . . . .                                                                         | —                        | 0,5933    | 0,6519   | —         | 1,2853  |
| 700 . . . . .                                                                         | —                        | 0,6343    | 0,6527   | —         | 1,3553  |
| 800 . . . . .                                                                         | —                        | 0,6908    | 0,6904   | —         | 1,4486  |
| 900 . . . . .                                                                         | —                        | 0,7118    | 0,7159   | —         | 1,5114  |
| 1000 . . . . .                                                                        | —                        | —         | —        | —         | 1,5721  |
| 1100 . . . . .                                                                        | —                        | —         | —        | —         | 1,6161  |
| Коэффициент термического линейного расширения $\beta \cdot 10^6$ см/(см·°C) . . . . . | 17,0—24,0                | 12,0—12,5 | 6,0—6,5  | 10,0—11,0 | 7,5—8,0 |
| Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·°C)                                                | 41,9                     | 76,8      | 7,1      | 51,9      | 155     |
| Молекулярная или атомная масса . . . . .                                              | 55,85                    | 55,85     | 179,5    | —         | 12,01   |

#### РАСЧЕТНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СТАЛЕЙ

Р. Е. Кржижановским предложен расчетный метод определения теплопроводности сталей, основанный на предположении, что при определенной термической обработке (отжиг для углеродистых и хромистых сталей и закалка или нормализация для сталей аустенитного класса) теплопроводность является функцией объемного содержания в стали всех элементов (кроме железа) и температуры. Объемное содержание примесей подсчитывают по формуле

$$V = \sum g_i \frac{A_{Fe}}{A_i} \%,$$

где  $V$  — суммарное объемное содержание примесей;  
 $g_i$  — массовое содержание элемента в стали, %;  
 $A$  — атомная масса.

Отношение  $A_{Fe}/A_i$  для различных элементов имеет следующее значение:

|              |      |      |       |       |      |      |       |       |
|--------------|------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|
| Элемент      | C    | Si   | Mn    | P     | S    | Cr   | Ni    | Mo    |
| $A_{Fe}/A_i$ | 4,66 | 1,99 | 1,02  | 1,86  | 1,74 | 1,07 | 0,952 | 0,582 |
| Элемент      | V    | W    | Co    | Cu    | Ti   | Nb   | Al    |       |
| $A_{Fe}/A_i$ | 1,09 | 0,32 | 0,947 | 0,878 | 1,16 | 2,07 | 0,60  |       |

Точность расчетных методов проверена на большом экспериментальном материале.

##### а. Теплопроводность углеродистых сталей

Расчетная формула для коэффициента теплопроводности в зависимости от температуры равна

$$\lambda = 33,5 + K (635 - t) 10^{-2} \text{ Вт/(м·°C)}.$$

Коэффициент  $K$ , зависящий от марки стали, можно определить по табл. IV-3, исходя из содержания основных элементов в металле.

$$V = 4,66 g_C + 1,99 g_{Si} + 1,02 g_{Mn}.$$

Здесь  $g_i$  — массовое содержание элемента в стали, %.

Таблица IV-3

Коэффициент  $K$  в зависимости от значения  $V$

| $V, \%$ | $K$  | $V, \%$ | $K$  | $V, \%$ | $K$  |
|---------|------|---------|------|---------|------|
| 0,2     | 6,49 | 1,6     | 3,39 | 4,5     | 2,55 |
| 0,4     | 5,91 | 1,8     | 3,22 | 5,0     | 2,51 |
| 0,6     | 5,39 | 2,0     | 3,09 | 5,5     | 2,43 |
| 0,8     | 4,85 | 2,5     | 2,93 | 6,0     | 2,36 |
| 1,0     | 4,35 | 3,0     | 2,85 | 6,5     | 2,30 |
| 1,2     | 3,93 | 3,5     | 2,72 | 7,0     | 2,26 |
| 1,4     | 3,64 | 4,0     | 2,64 | —       | —    |

Пределы применимости формулы:  $V=0,2\div 7\%$ ;  $t=50\div 500^\circ\text{C}$ . Точность формулы  $\sim 10\div 12\%$ .

#### 6. Теплопроводность хромистых сталей

Теплопроводность хромистых сталей может быть определена по приводимой ниже табл. IV-4.

Таблица IV-4

Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  хромистых сталей

| Температура,<br>$t, ^\circ\text{C}$ | $\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C}), \text{ при } V, \%$ |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                     | 4                                                                      | 6    | 8    | 10   | 12   | 14   | 16   | 18   | 20   | 22   | 24   | 26   | 28   | 30   |
| 100                                 | 33,5                                                                   | 30,9 | 28,8 | 27,7 | 26,4 | 25,6 | 25,1 | 24,7 | 24,7 | 24,3 | 24,1 | 23,8 | 23,5 | 23,3 |
| 200                                 | 32,7                                                                   | 30,1 | 28,5 | 27,2 | 26,5 | 25,9 | 25,7 | 25,6 | 25,1 | 24,9 | 24,7 | 24,3 | 24,3 | 23,8 |
| 300                                 | 31,4                                                                   | 29,3 | 28,0 | 27,2 | 26,6 | 26,2 | 25,9 | 25,9 | 25,6 | 25,6 | 25,6 | 25,4 | 25,1 | 25,1 |
| 400                                 | 30,1                                                                   | 28,6 | 27,6 | 27,2 | 26,7 | 26,4 | 26,2 | 25,9 | 25,9 | 25,9 | 28,6 | 28,6 | 28,6 | 28,6 |
| 500                                 | 28,8                                                                   | 28,0 | 27,4 | 26,9 | 26,7 | 26,4 | 26,4 | 26,4 | 26,4 | 26,4 | 26,4 | 26,4 | 26,4 | 26,4 |
| 600                                 | 27,7                                                                   | 27,2 | 26,6 | 26,7 | 26,7 | 26,7 | 26,7 | 26,7 | 26,7 | 26,7 | 26,7 | 26,7 | 26,7 | 26,7 |

Пределы применимости:  $V=4\div 30\%$ ;  $t=100\div 600^\circ\text{C}$ . Точность метода 10—15%.

### в. Теплопроводность сталей аустенитного класса

Расчетная формула для коэффициента теплопроводности

$$\lambda = 13,85 + 15,45 t \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{С)}.$$

Пределы применимости: для всех сталей аустенитного класса при  $t = 50 \div 900^\circ\text{С}$ . Точность формулы 10—15%.

### г. Теплопроводность углеродистых сталей

Б. Е. Неймарк приводит формулу для определения коэффициента теплопроводности углеродистых сталей, выведенную на основании обобщения большого числа экспериментальных данных, а также формулу для определения коэффициента теплопроводности хромоникелевых аустенитных сталей. Формулы Б. Е. Неймарка дают большую точность по сравнению с формулами Р. Е. Кржижановского, но имеют меньшие пределы по количеству легирующих элементов, содержащихся в стали.

Коэффициент теплопроводности углеродистых сталей  $\lambda$  рассчитывают по уравнению

$$\lambda = a - b \Sigma + c \Sigma^2 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{С)},$$

$$a = 76,8 - 6,68 \cdot 10^{-2} t;$$

где

$$b = 34,2 - 9,9 \cdot 10^{-2} t + 0,815 \cdot 10^{-4} t^2;$$

$$c = 9,31 - 3,96 \cdot 10^{-2} t + 0,418 \cdot 10^{-4} t^2;$$

$\Sigma$  — суммарная добавка остальных элементов (С, Si, Mn и др.) к железу, % (по массе).

Формула пригодна для значений  $\Sigma$  от 0,1 до 2,0 и температуры  $\leq 500^\circ\text{С}$  (табл. IV-5). Точность формулы  $\pm 4\%$ .

Таблица IV-5

Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  углеродистых сталей

| Температура<br>$t, ^\circ\text{С}$ | $\lambda, \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{С)}, \text{ при } \Sigma, \% \text{ (по массе)}$ |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                    | 0,1                                                                                        | 0,2  | 0,4  | 0,6  | 0,8  | 1,0  | 1,2  | 1,4  | 1,6  | 1,8  | 2,0  |
| 0                                  | 73,4                                                                                       | 70,2 | 64,5 | 59,5 | 55,4 | 51,9 | 48,1 | 47,1 | 45,9 | 45,5 | 45,6 |
| 50                                 | 70,5                                                                                       | 67,8 | 62,8 | 58,5 | 54,7 | 51,5 | 49,0 | 46,9 | 45,4 | 44,7 | 44,3 |
| 100                                | 67,6                                                                                       | 65,2 | 60,8 | 57,0 | 53,6 | 50,7 | 48,3 | 46,3 | 44,7 | 43,7 | 43,0 |
| 200                                | 61,5                                                                                       | 59,9 | 56,6 | 53,7 | 51,0 | 48,6 | 46,4 | 44,4 | 42,8 | 41,2 | 40,0 |
| 300                                | 55,6                                                                                       | 54,4 | 52,2 | 50,1 | 47,9 | 46,1 | 44,2 | 42,4 | 41,1 | 39,2 | 37,7 |
| 400                                | 49,2                                                                                       | 48,5 | 47,0 | 45,7 | 44,0 | 42,6 | 41,2 | 39,8 | 38,3 | 37,0 | 35,6 |
| 500                                | 42,9                                                                                       | 42,3 | 41,3 | 40,4 | 39,3 | 38,8 | 37,2 | 36,2 | 35,1 | 34,3 | 33,4 |

### д. Теплопроводность хромоникелевых аустенитных сталей

Теплопроводность хромоникелевых аустенитных сталей  $\lambda$  рассчитывают по уравнению

$$\lambda = 15,5 - a + (1,28 + b) 10^{-2} t \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{С)},$$

где  $a = 11,6 (\sigma - 0,5)$ ;  $b = 1,34 (\sigma - 0,5)$ ;

$\sigma$  — суммарная добавка, г-атом/100 г стали. Величину  $\sigma$  рассчитывают по уравнению

$$\sigma = \frac{C}{12} + \frac{Si}{28} + \frac{Mn}{55} + \frac{Cr}{52} + \frac{Ni}{59} + \frac{W}{184} + \frac{Nb}{93} + \frac{Mo}{96} + \text{и т. д.}$$

C, Si, Mn и т. д. — содержание в стали соответствующего элемента, % (по массе);

12, 28, 55 и т. д. — атомная масса этого элемента.

Формула пригодна для значений  $\sigma$  от 0,5 до 0,8 и температуры до 900°C (табл. IV-6). Точность формулы  $\pm 4\%$ .

Таблица IV-6

Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  хромоникелевых аустенитных сталей

| $\sigma$ | $\lambda$ , Вт/(м·°C), при температуре, °C |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------|--------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|          | 100                                        | 200  | 300  | 400  | 500  | 600  | 700  | 800  | 900  |
| 0,50     | 16,6                                       | 17,9 | 19,2 | 20,6 | 21,9 | 23,1 | 24,4 | 25,7 | 26,9 |
| 0,55     | 16,3                                       | 17,6 | 18,9 | 20,2 | 21,6 | 22,9 | 24,3 | 25,7 | 26,9 |
| 0,60     | 15,7                                       | 17,1 | 18,6 | 20,0 | 21,4 | 22,8 | 24,2 | 25,6 | 26,9 |
| 0,65     | 15,1                                       | 16,5 | 18,1 | 19,5 | 21,2 | 22,6 | 24,1 | 25,5 | 26,9 |
| 0,70     | 14,7                                       | 16,3 | 17,8 | 19,3 | 20,9 | 22,4 | 23,9 | 25,5 | 26,9 |
| 0,75     | 14,2                                       | 15,8 | 17,4 | 19,1 | 20,6 | 22,2 | 23,8 | 25,5 | 26,9 |
| 0,80     | 13,7                                       | 15,4 | 16,9 | 18,7 | 20,4 | 22,1 | 23,7 | 25,5 | 26,9 |

#### ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛЕЙ ПО ДАННЫМ РАЗЛИЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ниже приведены таблицы и графики, полученные на основании обработки экспериментального материала, для определения теплофизических характеристик различных сталей: коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , плотности  $\rho$ , теплоемкости  $c$ , коэффициента линейного расширения  $\beta$ , удельного электросопротивления  $\rho_e$ .

Если в приведенных ниже материалах отсутствуют данные для необходимой марки стали, то можно воспользоваться имеющимися значениями для другой стали, близкой по химическому составу. При этом надо помнить, что чем больше примесей в металле, тем меньше коэффициент теплопроводности. Другие теплофизические свойства сталей меняются менее существенно.

Линейную интерполяцию и особенно экстраполяцию экспериментальных данных нужно выполнять с большой осторожностью. Если в стали происходят структурные или фазовые превращения, то такие операции нельзя распространять на эти диапазоны температур.

Для многих сталей влияние температуры на коэффициент теплопроводности может быть учтено на основании следующих данных:

Для сталей с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_0 > 46$  Вт/(м·°C):

|                           |             |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
|---------------------------|-------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Температура, °C . . . . . | 0           | 200              | 400              | 600              | 800              | 1000             | 1200             |
| $\lambda_t$ . . . . .     | $\lambda_0$ | $0,95 \lambda_0$ | $0,85 \lambda_0$ | $0,75 \lambda_0$ | $0,68 \lambda_0$ | $0,68 \lambda_0$ | $0,73 \lambda_0$ |

Для сталей с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_0 < 46$  Вт/(м·°C):

$$\lambda_{200} = (1,07 - 0,0032 \lambda_0) \lambda_0; \quad \lambda_{800} = (1,46 - 0,021 \lambda_0) \lambda_0;$$

$$\lambda_{400} = (1,22 - 0,01 \lambda_0) \lambda_0; \quad \lambda_{1000} = (1,46 - 0,021 \lambda_0) \lambda_0;$$

$$\lambda_{800} = (1,36 - 0,017 \lambda_0) \lambda_0; \quad \lambda_{1200} = (1,37 - 0,017 \lambda_0) \lambda_0.$$

# 1. Углеродистые стали

Таблица IV-7

Химический состав исследованных углеродистых сталей, %

| Марка | C     | Si   | Mn    | S     | P     | Cr    | Ni    | Mo    | Cu    | Al    | As    | Режим термической обработки: отжиг при $t, ^\circ\text{C}$ |
|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------------------------------------------------|
| 08кп  | 0,06  | 0,01 | 0,38  | 0,035 | 0,017 | 0,022 | 0,055 | 0,030 | 0,08  | 0,001 | 0,039 | 930                                                        |
| 08    | 0,08  | 0,08 | 0,31  | 0,050 | 0,029 | 0,045 | 0,07  | 0,020 | Следы | 0,002 | 0,032 | 930                                                        |
| 20    | 0,23  | 0,11 | 0,635 | 0,034 | 0,034 | Следы | 0,074 | —     | 0,13  | 0,010 | 0,036 | 930                                                        |
| 04    | 0,415 | 0,11 | 0,643 | 0,029 | 0,031 | »     | 0,063 | —     | 0,12  | 0,006 | 0,033 | 860                                                        |
| У8    | 0,80  | 0,13 | 0,32  | 0,009 | 0,008 | 0,11  | 0,13  | 0,01  | 0,070 | 0,004 | 0,021 | 800                                                        |
| У8'   | 0,84  | 0,13 | 0,24  | 0,014 | 0,014 | Следы | Следы | —     | 0,020 | 0,004 | 0,008 | —                                                          |
| У12   | 1,22  | 0,16 | 0,35  | 0,015 | 0,009 | 0,11  | 0,13  | 0,01  | 0,077 | 0,006 | 0,025 | 800                                                        |

Таблица IV-8

Критические точки фазовых превращений углеродистых сталей,  $^\circ\text{C}$

| Марка | $A_{c_1}$ | $A_{c_s}$ | $A_{r_1}$ | $A_{r_s}$ | Марка | $A_{c_1}$ | $A_{c_s}$ | $A_{r_1}$ | $A_{r_s}$ |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 08кп  | 743       | —         | —         | —         | 15    | 735       | 735       | 685       | 840       |
| 08    | 738       | —         | —         | —         | 20    | 738       | 854       | 682       | 835       |
| 10    | 732       | 874       | 680       | 854       | 30    | 732       | 813       | 677       | 796       |

Таблица IV-9

Коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , Вт/(м·°C), углеродистых сталей различных марок в зависимости от температуры

| Температура, °C | Марка стали |      |      |      |      |      |      |
|-----------------|-------------|------|------|------|------|------|------|
|                 | 08кп        | 08   | 20   | 40   | У8   | У8'  | У12  |
| 0               | 65,1        | 59,5 | 51,9 | 51,9 | 49,8 | 51,1 | 45,2 |
| 50              | 62,8        | 58,6 | 51,5 | 51,5 | 49,4 | 50,2 | 45,2 |
| 100             | 60,2        | 57,7 | 51,1 | 50,6 | 48,1 | 48,9 | 44,8 |
| 150             | 57,7        | 55,2 | 49,9 | 49,8 | 46,9 | 47,7 | 42,4 |
| 200             | 55,6        | 53,5 | 48,5 | 48,1 | 45,1 | 46,1 | 42,7 |
| 250             | 53,0        | 51,5 | 46,5 | 46,9 | 43,0 | 43,9 | 41,1 |
| 300             | 50,9        | 49,4 | 44,4 | 45,6 | 41,4 | 41,9 | 40,2 |
| 350             | 48,5        | 47,7 | 43,6 | 44,3 | 40,2 | 40,2 | 38,5 |
| 400             | 46,5        | 44,8 | 42,7 | 41,9 | 38,1 | 37,6 | 37,2 |
| 450             | 43,5        | 42,3 | 41,1 | 40,0 | 36,4 | 36,9 | 36,1 |
| 500             | 41,1        | 40,2 | 39,3 | 38,1 | 35,2 | 35,6 | 34,7 |
| 550             | 39,4        | 38,1 | 37,7 | 36,1 | 33,9 | 34,4 | 33,5 |
| 600             | 37,4        | 36,1 | 35,6 | 33,6 | 32,7 | 33,3 | 31,9 |
| 650             | 36,1        | 33,9 | 33,9 | 31,9 | 31,4 | 31,9 | 30,0 |
| 700             | 33,9        | 31,9 | 31,9 | 30,0 | 30,1 | 30,7 | 28,3 |
| 750             | 31,9        | 29,8 | 28,5 | 26,9 | 26,9 | 27,3 | 26,9 |
| 800             | 30,1        | 28,5 | 25,9 | 24,8 | 24,3 | 24,3 | 23,7 |
| 850             | 27,7        | 27,2 | 25,9 | 24,8 | 24,3 | 24,3 | 23,7 |
| 900             | 27,2        | 26,7 | 26,4 | 25,7 | 25,7 | 25,2 | 24,8 |
| 950             | 27,2        | 27,2 | 27,2 | 26,1 | 26,5 | 26,1 | 25,7 |
| 1000            | 27,7        | 27,7 | 27,7 | 26,9 | 26,9 | 26,9 | 26,1 |
| 1050            | 28,0        | 28,0 | 28,0 | 27,2 | 27,7 | 27,7 | 26,9 |
| 1100            | 28,5        | 28,5 | 28,5 | 28,0 | 28,6 | 28,6 | 27,2 |
| 1150            | 29,3        | 29,3 | 29,3 | 28,7 | 29,4 | 28,7 | 28,0 |
| 1200            | 29,8        | 29,8 | 29,8 | 29,5 | 30,2 | 29,5 | 28,6 |

Таблица IV-10

Средняя теплоемкость  $c_{ср}$ , кДж/(кг·°C), углеродистых сталей различных марок в интервале температур от 50 до t°С

| Температура, °C | Углеродистые стали     |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 | Чистое железо (99,99%) | 08кп  | 08    | 20    | 40    | У8    | У8'   | У12   |
| 100             | 0,469                  | 0,486 | 0,486 | 0,486 | 0,486 | 0,486 | 0,502 | 0,486 |
| 150             | 0,477                  | 0,594 | 0,494 | 0,494 | 0,494 | 0,502 | 0,511 | 0,502 |
| 200             | 0,489                  | 0,502 | 0,502 | 0,502 | 0,498 | 0,515 | 0,523 | 0,815 |
| 250             | 0,498                  | 0,511 | 0,511 | 0,511 | 0,507 | 0,523 | 0,523 | 0,523 |
| 300             | 0,511                  | 0,519 | 0,519 | 0,519 | 0,515 | 0,532 | 0,519 | 0,532 |
| 350             | 0,519                  | 0,528 | 0,528 | 0,528 | 0,523 | 0,540 | 0,544 | 0,540 |
| 400             | 0,528                  | 0,536 | 0,540 | 0,540 | 0,532 | 0,548 | 0,553 | 0,544 |
| 450             | 0,536                  | 0,548 | 0,548 | 0,548 | 0,544 | 0,557 | 0,565 | 0,557 |
| 500             | 0,553                  | 0,561 | 0,561 | 0,561 | 0,557 | 0,589 | 0,574 | 0,565 |
| 550             | 0,561                  | 0,574 | 0,578 | 0,574 | 0,569 | 0,582 | 0,586 | 0,578 |

| Температура, °C | Углеродистые стали     |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 | Чистое железо (99,99%) | 08кп  | 08    | 20    | 40    | У8    | У8'   | У12   |
| 600             | 0,578                  | 0,590 | 0,590 | 0,590 | 0,582 | 0,595 | 0,503 | 0,586 |
| 650             | 0,595                  | 0,611 | 0,607 | 0,607 | 0,595 | 0,603 | 0,615 | 0,599 |
| 700             | 0,615                  | 0,628 | 0,628 | 0,628 | 0,607 | 0,619 | 0,632 | 0,615 |
| 750             | 0,641                  | 0,645 | 0,662 | 0,669 | 0,678 | 0,724 | 0,745 | 0,720 |
| 800             | 0,657                  | 0,678 | 0,682 | 0,703 | 0,674 | 0,716 | 0,737 | 0,716 |
| 850             | 0,666                  | 0,682 | 0,695 | 0,703 | 0,662 | 0,712 | 0,729 | 0,712 |
| 900             | 0,666                  | 0,695 | 0,703 | 0,703 | 0,657 | 0,708 | 0,724 | 0,708 |
| 950             | 0,682                  | 0,691 | 0,609 | 0,699 | 0,653 | 0,703 | 0,716 | 0,703 |
| 1000            | 0,678                  | 0,691 | 0,695 | 0,695 | 0,653 | 0,699 | 0,712 | 0,699 |
| 1050            | 0,669                  | 0,691 | 0,695 | 0,691 | 0,653 | 0,695 | 0,708 | 0,695 |
| 1100            | 0,666                  | 0,691 | 0,695 | 0,691 | 0,649 | 0,695 | 0,703 | 0,695 |
| 1150            | 0,666                  | 0,687 | 0,691 | 0,691 | 0,649 | 0,691 | 0,707 | 0,691 |
| 1200            | 0,666                  | 0,687 | 0,691 | 0,687 | 0,649 | 0,691 | 0,699 | 0,691 |
| 1250            | 0,662                  | 0,687 | 0,691 | 0,687 | 0,653 | 0,691 | 0,699 | 0,691 |
| 1300            | 0,662                  | 0,699 | 0,687 | 0,687 | 0,653 | 0,691 | 0,699 | 0,687 |

Таблица IV-11

Средняя теплоемкость  $c_{ср}$ , кДж/(кг·°C) углеродистых сталей

| Интервал температур, °C | Углеродистые стали   |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                         | Чистое железо 99,99% | 08кп  | 08    | 20    | 40    | У8    | У8'   | У12   |
| 50—100                  | 0,469                | 0,481 | 0,481 | 0,486 | 0,486 | 0,489 | 0,498 | 0,486 |
| 100—150                 | 0,489                | 0,502 | 0,502 | 0,507 | 0,502 | 0,519 | 0,523 | 0,519 |
| 150—200                 | 0,511                | 0,519 | 0,523 | 0,519 | 0,515 | 0,532 | 0,544 | 0,540 |
| 200—250                 | 0,528                | 0,536 | 0,544 | 0,532 | 0,528 | 0,548 | 0,548 | 0,544 |
| 250—300                 | 0,544                | 0,553 | 0,557 | 0,557 | 0,548 | 0,565 | 0,565 | 0,557 |
| 300—350                 | 0,565                | 0,574 | 0,569 | 0,574 | 0,569 | 0,586 | 0,552 | 0,578 |
| 350—400                 | 0,586                | 0,595 | 0,595 | 0,599 | 0,586 | 0,607 | 0,603 | 0,599 |
| 400—450                 | 0,611                | 0,624 | 0,624 | 0,624 | 0,611 | 0,628 | 0,632 | 0,615 |
| 450—500                 | 0,649                | 0,662 | 0,662 | 0,662 | 0,649 | 0,669 | 0,666 | 0,636 |
| 500—550                 | 0,691                | 0,708 | 0,695 | 0,703 | 0,691 | 0,695 | 0,708 | 0,662 |
| 550—600                 | 0,733                | 0,754 | 0,741 | 0,749 | 0,708 | 0,716 | 0,749 | 0,699 |
| 600—650                 | 0,775                | 0,799 | 0,791 | 0,787 | 0,733 | 0,720 | 0,779 | 0,745 |
| 650—700                 | 0,829                | 0,867 | 0,858 | 0,846 | 0,770 | 0,770 | 0,833 | 0,816 |
| 700—750                 | 0,971                | 1,105 | 1,139 | 0,432 | 1,583 | 2,081 | 2,186 | 2,089 |
| 750—800                 | 0,913                | 0,875 | 0,959 | 0,950 | 0,624 | 0,615 | 0,632 | 0,649 |
| 800—850                 | 0,754                | 0,795 | 0,867 | 0,737 | 0,502 | 0,657 | 0,619 | 0,657 |
| 850—900                 | 0,716                | 0,849 | 0,816 | 0,649 | 0,548 | 0,619 | 0,619 | 0,619 |
| 900—950                 | 0,946                | 0,662 | 0,649 | 0,649 | 0,624 | 0,624 | 0,619 | 0,619 |
| 950—1000                | 0,557                | 0,669 | 0,657 | 0,649 | 0,624 | 0,632 | 0,615 | 0,628 |
| 1000—1050               | 0,582                | 0,669 | 0,657 | 0,649 | 0,632 | 0,645 | 0,628 | 0,636 |
| 1050—1100               | 0,599                | 0,669 | 0,662 | 0,649 | 0,632 | 0,653 | 0,636 | 0,641 |
| 1100—1150               | 0,615                | 0,669 | 0,662 | 0,657 | 0,641 | 0,662 | 0,653 | 0,649 |
| 1150—1200               | 0,632                | 0,669 | 0,666 | 0,666 | 0,653 | 0,669 | 0,669 | 0,657 |
| 1200—1250               | 0,649                | 0,669 | 0,666 | 0,678 | 0,669 | 0,678 | 0,678 | 0,666 |
| 1250—1300               | 0,669                | 0,669 | 0,666 | 0,687 | 0,687 | 0,678 | 0,695 | 0,674 |

Таблица IV-12

Удельная энтальпия углеродистых сталей  $i$ , кДж/кг

| Температура,<br>°C | Чистое<br>железо | Углеродистые стали |        |        |        |        |        |
|--------------------|------------------|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                    |                  | 08кп               | 08     | 20     | 40     | У8     | У8'    |
| 100                | 46,89            | 48,57              | 48,57  | 48,56  | 48,57  | 48,57  | 48,57  |
| 150                | 71,59            | 74,11              | 74,11  | 74,11  | 74,11  | 75,36  | 75,36  |
| 200                | 97,97            | 100,48             | 100,48 | 100,48 | 99,65  | 102,99 | 102,99 |
| 250                | 124,56           | 127,69             | 127,69 | 127,69 | 126,65 | 130,84 | 130,84 |
| 300                | 153,24           | 175,55             | 155,75 | 155,75 | 154,49 | 159,52 | 159,52 |
| 350                | 181,71           | 184,64             | 184,64 | 184,64 | 183,17 | 189,03 | 189,03 |
| 400                | 211,01           | 214,36             | 216,04 | 216,04 | 212,69 | 219,39 | 221,06 |
| 450                | 241,16           | 246,81             | 246,81 | 246,81 | 244,93 | 250,58 | 254,35 |
| 500                | 276,33           | 280,52             | 280,52 | 280,52 | 278,42 | 284,70 | 286,79 |
| 550                | 308,57           | 315,48             | 317,78 | 315,48 | 313,17 | 320,08 | 322,38 |
| 600                | 367,67           | 354,20             | 354,20 | 354,20 | 349,18 | 356,72 | 361,74 |
| 650                | 386,44           | 397,33             | 394,61 | 394,61 | 386,44 | 391,88 | 400,05 |
| 700                | 430,82           | 439,61             | 439,61 | 439,61 | 424,96 | 433,75 | 442,54 |
| 750                | 480,44           | 483,58             | 496,14 | 502,42 | 508,59 | 543,24 | 558,94 |
| 800                | 525,86           | 542,61             | 545,96 | 562,71 | 539,26 | 572,75 | 589,50 |
| 850                | 565,85           | 580,08             | 590,76 | 597,88 | 562,29 | 604,99 | 619,23 |
| 900                | 599,13           | 625,51             | 633,04 | 633,04 | 591,59 | 636,81 | 651,88 |
| 950                | 648,33           | 656,28             | 664,24 | 664,24 | 620,48 | 668,28 | 680,15 |
| 1000               | 678,6            | 690,82             | 729,76 | 695,00 | 653,14 | 699,19 | 711,76 |
| 1050               | 703,38           | 725,36             | 698,00 | 725,36 | 685,70 | 729,76 | 742,95 |
| 1100               | 732,27           | 709,90             | 764,51 | 759,90 | 713,85 | 764,51 | 773,72 |
| 1150               | 769,74           | 789,63             | 794,45 | 794,45 | 746,29 | 794,45 | 808,89 |
| 1200               | 798,84           | 823,96             | 828,99 | 823,96 | 778,74 | 828,99 | 839,03 |
| 1250               | 826,89           | 858,29             | 863,53 | 858,29 | 816,43 | 863,53 | 873,99 |
| 1300               | 859,97           | 908,95             | 892,63 | 892,63 | 849,08 | 898,07 | 908,95 |

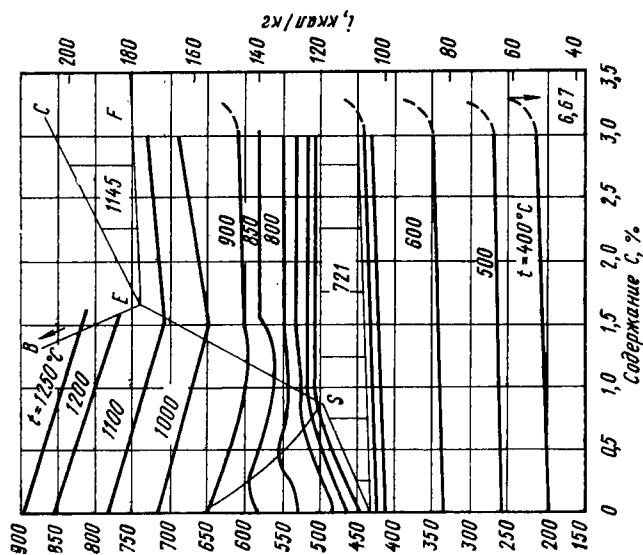


Рис. 20. Зависимость энтальпии  $i$  углеродистых сталей от температуры  $t$

Таблица IV-13

Плотность углеродистых сталей  $\rho$ , г/см<sup>3</sup>

| Температура,<br>°C | Углеродистые стали |       |       |       |       |       |
|--------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                    | 08кп               | 08    | 20    | 30    | У8    | У12   |
| 0                  | 7,876              | 7,861 | 7,863 | 7,858 | 7,855 | 7,834 |
| 15                 | 7,871              | 7,856 | 7,859 | 7,854 | 7,851 | 7,830 |
| 50                 | 7,861              | 7,847 | 7,849 | 7,845 | 7,842 | 7,822 |
| 100                | 7,846              | 7,832 | 7,834 | 7,832 | 7,829 | 7,809 |
| 150                | 7,830              | 7,846 | 7,819 | 7,817 | 7,815 | 7,796 |
| 200                | 7,814              | 7,800 | 7,803 | 7,801 | 7,800 | 7,781 |
| 250                | 7,798              | 7,783 | 7,787 | 7,784 | 7,784 | 7,765 |
| 300                | 7,781              | 7,765 | 7,770 | 7,766 | 7,767 | 7,749 |
| 350                | 7,763              | 7,748 | 7,753 | 7,748 | 7,749 | 7,731 |
| 400                | 7,745              | 7,730 | 7,736 | 7,730 | 7,731 | 7,713 |
| 450                | 7,727              | 7,711 | 7,718 | 7,711 | 7,713 | 7,694 |
| 500                | 7,708              | 7,692 | 7,699 | 7,692 | 7,694 | 7,675 |
| 550                | 7,688              | 7,673 | 7,679 | 7,672 | 7,675 | 7,655 |
| 600                | 7,668              | 7,653 | 7,659 | 7,652 | 7,655 | 7,634 |
| 650                | 7,648              | 7,632 | 7,635 | 7,628 | 7,632 | 7,613 |
| 700                | 7,628              | 7,613 | 7,617 | 7,613 | 7,612 | 7,592 |
| 750                | 7,610              | 7,594 | 7,620 | 7,624 | 7,604 | 7,581 |
| 800                | 7,598              | 7,582 | 7,624 | 7,635 | 7,594 | 7,565 |
| 850                | 7,601              | 7,589 | 7,616 | 7,617 | 7,565 | 7,528 |
| 900                | 7,602              | 7,594 | 7,600 | 7,590 | 7,533 | 7,489 |
| 950                | 7,580              | 7,572 | 7,574 | 7,564 | 7,509 | 7,463 |
| 1000               | 7,550              | 7,543 | 7,548 | 7,538 | 7,485 | 7,438 |
| 1050               | 7,523              | 7,515 | 7,522 | 7,512 | 7,460 | 7,413 |
| 1100               | 7,495              | 7,488 | 7,496 | 7,486 | 7,436 | 7,388 |

Рис. 2г. Зависимость коэффициента температуропроводности  $\alpha$  некоторых легированных сталей от температуры:

1 — 30Г2; 2 — 30ХН3; 3 — 50С2Г; 4 — Р18;  
5 и 6 — хромоникелевые аустенитные стали;  
7 — Г13

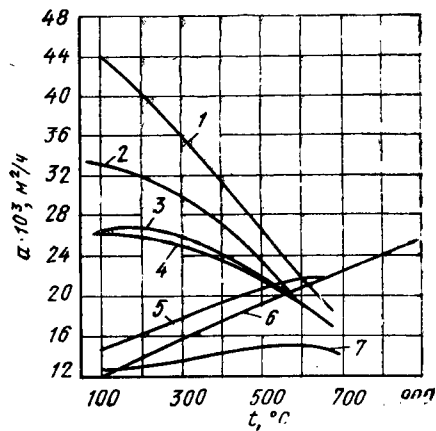


Таблица IV-14

Коэффициент температуропроводности углеродистых сталей  $\alpha$ , м²/ч

| Интервал температур,<br>°C | Углеродистые стали |       |       |       |       |       |
|----------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                            | 08кп               | 08    | 20    | 40    | У8    | У12   |
| 50—100                     | 0,059              | 0,055 | 0,049 | 0,048 | 0,046 | 0,043 |
| 100—150                    | 0,053              | 0,052 | 0,046 | 0,046 | 0,042 | 0,040 |
| 150—200                    | 0,050              | 0,048 | 0,044 | 0,044 | 0,040 | 0,038 |
| 200—250                    | 0,047              | 0,045 | 0,041 | 0,041 | 0,037 | 0,036 |
| 250—300                    | 0,044              | 0,042 | 0,038 | 0,039 | 0,035 | 0,034 |
| 300—350                    | 0,040              | 0,040 | 0,036 | 0,037 | 0,032 | 0,032 |
| 350—400                    | 0,037              | 0,036 | 0,033 | 0,034 | 0,030 | 0,029 |

| Интервал температур, °C | Углеродистые стали |       |       |       |       |       |
|-------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                         | 08кп               | 08    | 20    | 40    | У8    | У12   |
| 400—450                 | 0,034              | 0,033 | 0,031 | 0,031 | 0,028 | 0,028 |
| 450—500                 | 0,030              | 0,029 | 0,028 | 0,028 | 0,025 | 0,026 |
| 500—550                 | 0,027              | 0,026 | 0,026 | 0,025 | 0,023 | 0,024 |
| 550—600                 | 0,024              | 0,023 | 0,023 | 0,023 | 0,022 | 0,022 |
| 600—650                 | 0,022              | 0,021 | 0,021 | 0,021 | 0,021 | 0,020 |
| 650—700                 | 0,019              | 0,018 | 0,018 | 0,019 | 0,019 | 0,017 |
| 700—750                 | 0,014              | 0,013 | 0,010 | 0,009 | 0,007 | 0,006 |
| 750—800                 | 0,017              | 0,014 | 0,014 | 0,020 | 0,020 | 0,019 |
| 800—850                 | 0,017              | 0,015 | 0,017 | 0,018 | 0,019 | 0,019 |
| 850—900                 | 0,015              | 0,016 | 0,019 | 0,019 | 0,019 | 0,019 |
| 900—950                 | 0,019              | 0,019 | 0,019 | 0,019 | 0,020 | 0,019 |
| 950—1000                | 0,019              | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 |
| 1000—1050               | 0,020              | 0,020 | 0,021 | 0,020 | 0,020 | 0,020 |
| 1050—1100               | 0,020              | 0,021 | 0,021 | 0,021 | 0,021 | 0,021 |

Таблица IV-15

Средний коэффициент линейного расширения  $\beta_{10^6}$ ,  $1/^\circ\text{C}$ , углеродистых сталей для интервала температур от 0 до  $t^\circ\text{C}$

| Температура, °C | Углеродистые стали |       |       |       |       |       |
|-----------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 | 08кп               | 08    | 20    | 40    | У8    | У12   |
| 50              | 12,38              | 11,74 | 11,92 | 10,72 | 10,84 | 10,30 |
| 100             | 12,62              | 12,19 | 12,18 | 11,21 | 11,11 | 10,60 |
| 150             | 12,86              | 12,63 | 12,43 | 11,69 | 11,39 | 10,90 |
| 200             | 13,08              | 12,99 | 12,66 | 12,14 | 11,72 | 11,25 |
| 250             | 13,27              | 13,27 | 12,88 | 12,60 | 12,11 | 11,68 |
| 300             | 13,46              | 13,51 | 13,08 | 13,00 | 12,49 | 12,11 |
| 350             | 13,64              | 13,71 | 13,27 | 13,31 | 12,84 | 12,51 |
| 400             | 13,63              | 13,91 | 13,47 | 13,58 | 13,15 | 12,88 |
| 450             | 14,04              | 14,11 | 13,67 | 13,82 | 13,41 | 13,21 |
| 500             | 14,25              | 14,30 | 13,92 | 14,05 | 13,65 | 13,53 |
| 550             | 14,45              | 14,49 | 14,17 | 14,33 | 13,90 | 13,85 |
| 600             | 14,65              | 14,68 | 14,41 | 14,58 | 14,16 | 14,16 |
| 650             | 14,88              | 14,91 | 14,85 | 14,98 | 14,56 | 14,50 |
| 700             | 15,00              | 15,05 | 14,88 | 14,85 | 14,74 | 14,69 |
| 750             | 15,01              | 15,10 | 13,75 | 13,22 | 14,19 | 14,38 |
| 800             | 14,72              | 14,79 | 12,64 | 11,84 | 13,83 | 14,33 |
| 850             | 13,68              | 13,57 | 12,33 | 12,04 | 14,45 | 15,32 |
| 900             | 12,89              | 12,60 | 12,41 | 12,65 | 15,19 | 16,33 |
| 950             | 13,20              | 12,88 | 12,91 | 13,14 | 15,47 | 16,60 |
| 1000            | 13,79              | 13,49 | 13,37 | 13,59 | 15,72 | 16,84 |
| 1050            | 14,24              | 13,96 | 13,78 | 13,99 | 15,95 | 17,06 |
| 1100            | 14,65              | 14,38 | 14,16 | 14,36 | 16,15 | 17,26 |
| 1150            | 15,02              | 14,77 | 14,50 | 14,69 | 16,34 | 17,44 |
| 1200            | 15,37              | 15,12 | 14,81 | 15,00 | 16,52 | 17,50 |

Таблица IV-16

Удельное электросопротивление углеродистых сталей  $\rho \cdot 10^6$ , Ом·см

| Температура, °C | Углеродистые стали |      |      |      |      |      |      |
|-----------------|--------------------|------|------|------|------|------|------|
|                 | 08кп               | 08   | 20   | 40   | У8   | У8'  | У12  |
| 0               | 12,0               | 13,2 | 15,9 | 16,0 | 17,0 | 16,5 | 18,4 |
| 20              | 13,0               | 14,2 | 16,9 | 17,1 | 18,0 | 17,6 | 19,6 |
| 50              | 14,7               | 15,9 | 18,7 | 18,9 | 19,8 | 19,4 | 21,6 |
| 100             | 17,8               | 19,0 | 21,9 | 22,1 | 23,2 | 22,8 | 25,2 |
| 150             | 21,3               | 22,4 | 25,4 | 25,7 | 26,8 | 26,3 | 29,0 |
| 200             | 25,2               | 26,3 | 29,2 | 29,6 | 30,8 | 30,3 | 33,3 |
| 250             | 29,5               | 30,5 | 33,4 | 33,9 | 35,1 | 34,6 | 37,9 |
| 300             | 34,1               | 35,2 | 38,1 | 38,7 | 39,8 | 39,2 | 43,0 |
| 350             | 39,3               | 40,2 | 43,2 | 43,8 | 45,0 | 44,3 | 48,3 |

| Температура,<br>°C | Углеродистые стали |       |       |       |       |       |       |
|--------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                    | 08кп               | 08    | 20    | 40    | У8    | У8'   | У12   |
| 400                | 44,8               | 45,8  | 48,7  | 49,3  | 50,5  | 49,8  | 54,0  |
| 450                | 50,9               | 51,8  | 54,6  | 55,3  | 56,5  | 55,7  | 60,1  |
| 500                | 57,5               | 58,4  | 60,1  | 61,9  | 62,8  | 62,2  | 66,5  |
| 550                | 64,8               | 65,7  | 68,2  | 68,9  | 69,9  | 69,2  | 73,4  |
| 600                | 72,5               | 73,4  | 75,8  | 76,6  | 77,2  | 76,7  | 80,2  |
| 650                | 80,7               | 81,6  | 83,7  | 84,4  | 85,2  | 84,3  | 87,8  |
| 700                | 89,8               | 90,5  | 92,5  | 93,2  | 93,5  | 92,7  | 96,4  |
| 750                | 100,3              | 101,1 | 106,0 | 107,9 | 110,5 | 110,7 | 113,0 |
| 800                | 107,3              | 108,1 | 109,4 | 111,1 | 112,9 | 112,9 | 115,2 |
| 850                | 110,4              | 111,1 | 111,8 | 113,1 | 114,8 | 114,9 | 117,6 |
| 900                | 112,4              | 113,0 | 113,6 | 114,9 | 116,4 | 116,6 | 119,6 |
| 950                | 114,2              | 114,8 | 115,2 | 116,6 | 117,8 | 118,2 | 121,2 |
| 1000               | 116,0              | 116,5 | 116,7 | 117,9 | 119,1 | 119,7 | 122,6 |
| 1050               | 117,5              | 117,9 | 118,1 | 119,3 | 120,4 | 120,9 | 123,8 |
| 1100               | 118,9              | 119,3 | 119,4 | 120,7 | 121,4 | 122,2 | 124,9 |
| 1150               | 120,3              | 120,7 | 120,7 | 122,0 | 122,3 | 123,5 | 126,0 |
| 1200               | 121,7              | 122,0 | 121,9 | 123,0 | 123,1 | 124,6 | 127,1 |
| 1250               | 123,0              | 123,3 | 122,9 | 124,0 | 123,8 | 125,9 | 128,2 |
| 1300               | 124,1              | 124,4 | 123,9 | —     | 124,6 | 126,7 | 128,7 |
| 1350               | 125,2              | 125,3 | 125,1 | —     | 125,0 | 127,4 | 129,5 |

Рис. 22. Зависимость удельной электропроводности  $k$  эвтектоидной стали от температуры  $t$

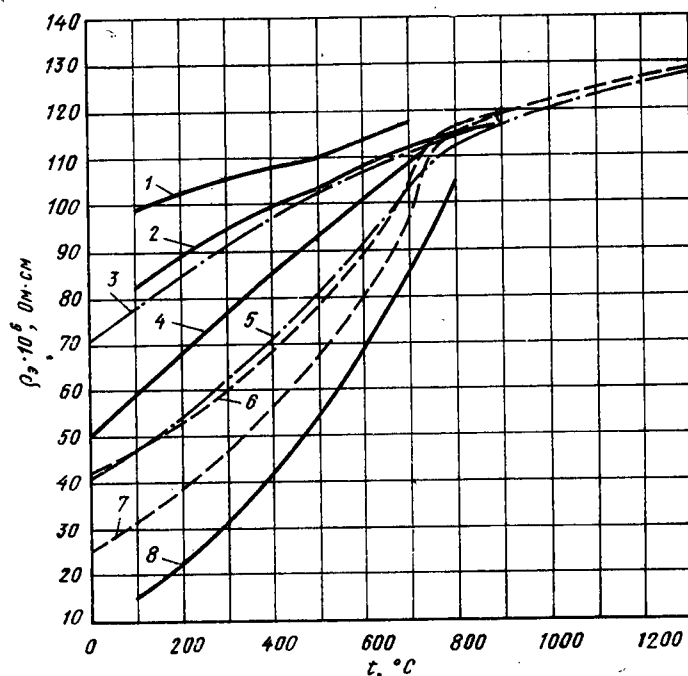
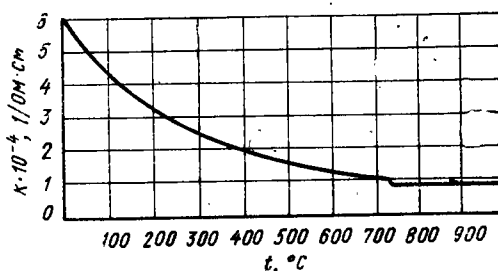


Рис. 23. Зависимость удельного сопротивления  $\rho$  некоторых легированных сталей к армо-железа от температуры:

1 — X18H25C2; 2 — X14H14B2M; 3 — X18H9T; 4 — хромистые нержавеющие стали; 5 — P18; 6 — 50C2Г; 7 — 30XH3A; 8 — армо-железо

Таблица IV-17

Теплофизические свойства некоторых углеродистых сталей в зависимости от температуры

| Марка стали | Плотность<br>$\rho$ ,<br>г/см <sup>3</sup> | Коэффициент линейного расширения $\beta \cdot 10^6$ , 1/°C |           |           |           |           |         | Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·°C) |      |                 |      |      |      |       |       | Теплоемкость<br>$c$ , кДж/(кг·°C) |       |  |  |  |  |
|-------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|----------------------------------------|------|-----------------|------|------|------|-------|-------|-----------------------------------|-------|--|--|--|--|
|             |                                            |                                                            |           |           |           |           |         |                                        |      | Температура, °C |      |      |      |       |       |                                   |       |  |  |  |  |
|             |                                            | 20—100                                                     | 20—200    | 20—300    | 20—400    | 20—500    | 20—600  | 100                                    | 200  | 300             | 400  | 500  | 600  | 0—100 | 0—200 | 0—400                             | 0—500 |  |  |  |  |
| 25          | 7,85                                       | 11,1                                                       | 12,3      | —         | 13,3      | —         | 14,3    | 50,6                                   | 48,5 | —               | 42,3 | —    | 35,6 | 0,469 | 0,482 | 0,524                             | 0,570 |  |  |  |  |
| 35          | 7,85                                       | 11,1                                                       | 11,9      | —         | 13,4      | 14,4      | —       | 50,6                                   | 48,5 | —               | 42,3 | —    | 35,6 | 0,469 | 0,482 | 0,524                             | 0,570 |  |  |  |  |
| 45          | 7,85                                       | 12,0                                                       | 12,4      | —         | 13,3      | —         | 14,1    | 48,1                                   | 46,5 | —               | 41,1 | —    | 36,1 | 0,469 | 0,482 | 0,524                             | 0,574 |  |  |  |  |
| 15K, 20K    | 7,85                                       | —                                                          | 11,8—12,1 | 12,4—13,1 | 13,1—13,3 | 13,4—13,7 | 13,85   | 57,0                                   | 52,7 | —               | 44,7 | —    | 37,5 | 0,469 | 0,482 | 0,524                             | 0,570 |  |  |  |  |
| 22K, 25K    | 7,85                                       | —                                                          | 11,6—12,8 | 12,4—13,4 | 13,0—13,6 | 13,6—14,2 | —       | 49,4                                   | 46,5 | 45,6            | 42,3 | 41,9 | 45,3 | —     | —     | —                                 | —     |  |  |  |  |
| 22TK        | 7,85                                       | 10,53*1                                                    | 11,77*1   | 12,58*1   | 13,12*1   | 13,66*1   | 13,96*2 | —                                      | —    | —               | —    | —    | —    | —     | —     | —                                 | —     |  |  |  |  |
| 50Г         | —                                          | 11,6                                                       | 11,9      | —         | 13,8      | —         | 14,6    | —                                      | 38,4 | 37,8            | 36,3 | —    | —    | 0,474 | 0,482 | 0,524                             | 0,545 |  |  |  |  |
| 35Г2, 40Г2  | —                                          | —                                                          | —         | —         | —         | —         | —       | —                                      | 37,8 | 38,2            | 35,9 | —    | —    | —     | —     | —                                 | —     |  |  |  |  |
| 50Г2        | —                                          | —                                                          | —         | —         | —         | —         | —       | 40,4                                   | 39,9 | —               | 36,0 | 34,9 | —    | —     | —     | —                                 | —     |  |  |  |  |

\* Значения температур не от 20°C, а от 25°C. \*\* Интервал температур от 25 до 550°C.

## 2. Низколегированные стали

Таблица IV-18

Химический состав исследованных низколегированных сталей\*, %

| Номер марки стали | Марка стали | C         | Mn      | Si        | Cr      | Mo        | Ni    | Ti | V    | W | Cu    | Режим термической обработки | Температурный интервал исследований, °C |
|-------------------|-------------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|-------|----|------|---|-------|-----------------------------|-----------------------------------------|
| 1                 | 15ХМ        | ≤0,16     | 0,4—0,7 | 0,17—0,37 | 0,8—1,1 | 0,4—0,55  | ≤0,3  | —  | —    | — | —     | —                           | 20—600                                  |
| 2                 | 30ХМА       | 0,25—0,35 | 0,4—0,7 | 0,17—0,37 | 0,8—1,1 | 0,15—0,25 | ≤0,3  | —  | —    | — | —     | —                           | 20—700                                  |
| 3                 | 15ХФ        | 0,15      | 0,57    | 0,56      | 1,08    | —         | —     | —  | 0,30 | — | —     | —                           | 20—1100                                 |
| 4                 | 30Х         | 0,315     | 0,69    | 0,20      | 1,09    | —         | 0,073 | —  | —    | — | 0,060 | Отжиг, 860°C                | 0—1100                                  |
| 5                 | 12ХН2       | 0,13      | 0,33    | 0,19      | 0,39    | —         | 2,18  | —  | —    | — | —     | —                           | 20—900                                  |
| 6                 | 12ХН3       | 0,15      | 0,47    | 0,37      | 0,70    | —         | 2,95  | —  | —    | — | —     | —                           | 20—900                                  |

| Номер марки стали | Марка стали    | C         | Mn      | Si        | Cr      | Mo        | Ni    | Ti  | V         | W        | Cu     | Режим термической обработки                             | Температурный интервал исследований, °C |
|-------------------|----------------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|-------|-----|-----------|----------|--------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 7                 | 20XH3          | 0,26      | 0,45    | 0,32      | 1,04    | —         | 3,41  | —   | —         | —        | —      | —                                                       | 20—900                                  |
| 8                 | 30XH3          | 0,33      | 0,53    | 0,17      | 0,80    | 0,07      | 3,38  | —   | —         | —        | 0,053  | Отжиг, 860°C, затем нагрев до 640°C и охлаждение в печи | 0—1100                                  |
| 9                 | 12XH3A         | 0,12      | 0,35    | 0,23      | 0,77    | —         | 2,90  | —   | —         | —        | —      | —                                                       | 20—600                                  |
| 10                | 20XH4Ф         | 0,19      | 0,30    | 0,34      | 1,05    | —         | 4,35  | —   | —         | —        | 0,12   | —                                                       | 20—900                                  |
| 11                | 18X2H4BA       | 0,19      | 0,43    | 0,48      | 1,42    | —         | 4,33  | —   | —         | 1,1      | —      | —                                                       | 20—900                                  |
| 12                | X6M            | ≤0,15     | ≤0,5    | ≤0,5      | 5—6,5   | —         | ≤0,6  | —   | 0,15—0,25 | 0,45—0,6 | —      | —                                                       | 0—700                                   |
| 13                | 30Г2           | 0,23      | 1,51    | 0,12      | 0,06    | 0,025     | 0,04  | —   | —         | —        | 0,125  | Отжиг, 860°C                                            | 0—1300                                  |
| 14                | 30XГC          | 0,36      | 0,90    | 1,05      | 1,04    | —         | —     | —   | —         | —        | —      | —                                                       | 20—800                                  |
| 15                | 15M            | 0,10—0,18 | 0,4—0,7 | 0,17—0,37 | ≤0,3    | 0,4—0,55  | ≤0,3  | —   | —         | —        | —      | —                                                       | —                                       |
| 16                | 12MX           | 0,15      | 0,54    | 0,28      | 0,52    | 0,50      | —     | —   | —         | —        | —      | Отжиг, 930°C                                            | 20—900                                  |
| 17                | 20XM           | 0,15—0,25 | 0,4—0,7 | 0,15—0,30 | 0,8—1,1 | 0,15—0,25 | ≤0,3  | —   | —         | —        | —      | —                                                       | —                                       |
| 18                | 12XMФ          | ≤0,12     | 0,4—0,6 | 0,2—0,4   | 0,9—1,2 | 0,25—0,35 | —     | —   | 0,15—0,3  | —        | —      | Нагрев, 740°C, охлаждение с печью                       | 20—900                                  |
| 19                | 10X2Ф          | 0,08      | 0,27    | 0,21      | 1,55    | —         | —     | —   | 0,31      | —        | —      | То же                                                   | 20—900                                  |
| 20                | 10X2ФТ         | 0,09      | 0,25    | 0,44      | 1,62    | —         | —     | —   | 0,35      | —        | —      | —                                                       | 20—900                                  |
| 21                | 10X2ФМ         | 0,08      | 0,32    | 0,22      | 1,55    | 0,18      | —     | 0,1 | 0,35      | —        | —      | —                                                       | 20—900                                  |
| 22                | 10X2ФВ         | 0,09      | 0,27    | 0,42      | 1,53    | —         | —     | —   | 0,4       | 0,72     | —      | —                                                       | 20—900                                  |
| 23                | 10X2МФ (ЭИ531) | ≤0,12     | 0,4—0,7 | 0,4—0,7   | 2,1—2,6 | 0,5—0,7   | —     | —   | 0,2—0,35  | —        | —      | —                                                       | —                                       |
| 24                | 10X2МБ (ЭИ454) | ≤0,12     | 0,4—0,7 | 0,4—0,7   | 2,1—2,6 | 0,8—1,0   | —     | —   | —         | —        | Nb 1,3 | —                                                       | —                                       |
| 25                | 25X2МФ         | 0,22—0,30 | 0,4—0,7 | 0,17—0,37 | 1,6—1,8 | 0,25—0,35 | ≤0,3  | —   | 0,2—0,3   | —        | —      | —                                                       | 20—600                                  |
| 26                | 40X3M (ЭИ10)   | 0,4       | 0,6     | 0,3       | 3,0     | 0,5       | —     | —   | —         | 0,2      | —      | —                                                       | 20—800                                  |
| 27                | 20X3ФВМ        | 0,23      | —       | —         | 2,7     | 0,5       | 0,3   | —   | —         | 0,75     | —      | —                                                       | 20—800                                  |
| 28                | 12X5CMA        | ≤0,15     | 0,4—0,7 | 1,5—2,0   | 5—6,5   | 0,5       | ≤0,5  | —   | —         | —        | 0,5    | —                                                       | 0—700                                   |
| 29                | 50C2Г          | 0,485     | 0,90    | 1,98      | 0,04    | —         | 0,156 | —   | —         | —        | 0,086  | Отжиг, 930°C                                            | 0—1300                                  |
| 30                | 30H3           | 0,325     | 0,55    | 0,18      | 0,17    | 0,04      | 3,47  | —   | —         | —        | 0,086  | Отжиг, 860°C                                            | 0—1300                                  |

Примечания: 1. Стали № 15—29 негостированные. 2. Сталь после эксплуатации подвергалась нормализации, затем закалке в масле и отпуску при 720°C.

\* Марка обозначена не по ГОСТу, а по химическому составу стали.



| Номер<br>марки<br>стали | Марка стали    | Температура $t$ , °C |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------|----------------|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                         |                | 20                   | 100  | 200  | 300  | 400  | 500  | 600  | 700  | 800  | 900  | 1000 | 1100 |
| 8                       | 15XΦ           | —                    | 45   | 44,3 | 43,5 | 40,7 | 37,7 | 33,7 | 29,8 | —    | —    | —    | —    |
| 8a                      | 15XΦ           | —                    | 43,1 | 42,3 | 42,1 | 39,7 | 36,4 | 33,5 | 29,8 | —    | —    | —    | —    |
| 9                       | 30X            | 47,7                 | 46,5 | 44,4 | 42,3 | 38,5 | 35,6 | 31,9 | 28,8 | 26,1 | 26,7 | 28,0 | 28,8 |
| 9a                      | 30X            | —                    | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |
| 14                      | 10X2MΦ (ЭИ531) | 42,7                 | 42,7 | 41,9 | 40,7 | 38,9 | 36,5 | 33,9 | 31,1 | 26,4 | 27,2 | 28,0 | 29,3 |
| 15                      | 10X2MБ (ЭИ454) | —                    | 38,4 | 37,8 | 37,8 | 37,2 | 35,5 | 32,6 | 29,1 | —    | 27,3 | —    | —    |
| 16                      | 25X2MΦ (ЭИ10)  | —                    | 37,2 | 36,6 | 36,1 | 36,1 | 34,9 | 32,6 | 29,1 | —    | 27,3 | —    | —    |
| 17                      | 12X2H (Э1)     | 33,0                 | 41,9 | 41,4 | 41,1 | 39,5 | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |
| 18                      | 25H3           | —                    | 33,0 | 33,4 | —    | —    | 35,5 | 32,6 | 29,8 | 28,1 | 27,3 | —    | —    |
| 19                      | 12XH3 (25)     | 37,2                 | 37,7 | 38,6 | 38,1 | 36,4 | 34,3 | 31,9 | 28,5 | 25,1 | 26,4 | 27,7 | 28,6 |
| 20                      | 20XH3 (Э6)     | 37,8                 | —    | —    | —    | —    | 31,4 | —    | 25,6 | —    | 25,6 | —    | —    |
| 21                      | 30XH3          | 45,4                 | 43   | 39,5 | —    | —    | 36,5 | —    | 29,1 | 29,1 | —    | —    | —    |
| 21a                     | 30XH3          | 35,2                 | 36   | 36,9 | 36,9 | 36,5 | 35,2 | 33,5 | 29,3 | 26,1 | 26,4 | 27,7 | 28,8 |
| 21a                     | 30XH3          | 33,7                 | 35,6 | 36,6 | 36,5 | 36,5 | 34,3 | 31,9 | 28,5 | 26,1 | 26,4 | 27,7 | 28,8 |
| 21б                     | 30XH3          | 33,5                 | 33,9 | 35,1 | 35,6 | 35,6 | 33,5 | 30,6 | 28,0 | 26,7 | 28,8 | 28,6 | 29,3 |
| 23                      | 35XH3          | —                    | 36,1 | 37,2 | 36,5 | 36,9 | 35,1 | 31,4 | 28,0 | —    | 27,3 | —    | —    |
| 24                      | 20XH4Φ (Э14)   | 37,7                 | 37,7 | 37,7 | 36,9 | 35,4 | 33,5 | 31,2 | 28,8 | 27,6 | 27,1 | —    | —    |
| 25                      | 20XH4Б (Э16)   | 26,2                 | 26,2 | 26,2 | —    | —    | 32,6 | —    | —    | 28,5 | —    | —    | —    |
| 25a                     | 20XH4B (Э16)   | 27,3                 | 28,3 | 29,3 | —    | —    | 32,6 | —    | 27,9 | 27,3 | 28,3 | —    | —    |
| 26                      | 40X3M          | —                    | 37,2 | 37,7 | 36,8 | 34,7 | 33,0 | 30,9 | 29,3 | —    | —    | —    | —    |
| 27                      | 20XЭФВМ        | —                    | 32,2 | 33,5 | 33,8 | 33,5 | 32,2 | 30,6 | 28,8 | —    | —    | —    | —    |
| 28                      | 12X5CMA        | —                    | 30,2 | 30,2 | 31,4 | 32,6 | 31,4 | 29,1 | 27,9 | 26,7 | 27,3 | —    | —    |
| 29                      | X6M            | —                    | 36,6 | —    | 35,1 | 34,2 | 33,5 | 33,5 | —    | —    | —    | —    | —    |
| 30                      | 30Г2           | 46,3                 | 34,9 | 44,8 | 43,7 | 40,2 | 37,2 | 34,4 | 31,4 | 29,8 | 25,6 | 27,2 | 28,6 |
| 31                      | 50C2Г          | 26,7                 | 28,5 | 30,2 | 31,1 | 31,1 | 31,1 | 30,2 | 28,0 | 25,1 | 25,6 | 26,4 | 27,7 |
| 32                      | 30XГC (ЭИ179)  | —                    | 37,2 | 40,7 | 38,4 | 37,2 | 36,1 | 34,9 | 33,7 | 32,6 | —    | —    | —    |

Таблица IV-21

Средняя теплоемкость низколегированных сталей  $c$ , кДж/(кг·°C), в интервале температур от 50 до 1300

| Марка стали | Температура, °C |       |        |        |        |        |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------|-----------------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|             | 100             | 200   | 300    | 400    | 500    | 600    | 700   | 800   | 900   | 1000  | 1100  | 1200  | 1300  |
| 30X         | 0,494           | 0,507 | 0,523  | 0,536  | 0,565  | 0,586  | 0,624 | 0,703 | 0,687 | 0,678 | 0,674 | 0,669 | 0,669 |
| 12XH3A      | —               | —     | —      | 0,528* | 0,540* | 0,565* | —     | —     | —     | —     | —     | —     | —     |
| 30Г2        | 0,477           | 0,494 | 0,511  | 0,528  | 0,548  | 0,582  | 0,615 | 0,687 | 0,669 | 0,662 | 0,653 | 0,662 | 0,569 |
| 50C2Г       | 0,502           | 0,511 | 0,528  | 0,544  | 0,565  | 0,595  | 0,628 | 0,695 | 0,687 | 0,678 | 0,678 | 0,678 | 0,678 |
| 30XГC       | —               | —     | 0,511* | 0,532* | 0,548* | 0,578* | —     | —     | —     | —     | —     | —     | —     |

\* В интервале температур от 20 до 1°C.

Таблица IV-22

Теплоемкость низколегированных сталей  $c_{ср}$ , кДж/(кг·°C)

| Интервал температур, °C | Марка стали |       |       |       |       | Интервал температур, °C | Марка стали |       |       |       |       |
|-------------------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------------------------|-------------|-------|-------|-------|-------|
|                         | 30X         | 30H3  | 30XH3 | 30Г2  | 50C2Г |                         | 30X         | 30H3  | 30XH3 | 30Г2  | 50C2Г |
| 50—100                  | 0,486       | 0,481 | 0,494 | 0,477 | 0,498 | 700—750                 | 1,662       | 0,955 | 1,176 | 1,449 | 0,904 |
| 100—150                 | 0,107       | 0,502 | 0,507 | 0,494 | 0,511 | 750—800                 | 0,636       | 0,603 | 0,976 | 0,821 | 1,365 |
| 150—200                 | 0,523       | 0,523 | 0,523 | 0,511 | 0,523 | 800—850                 | 0,653       | 0,624 | 0,569 | 0,557 | 0,611 |
| 200—250                 | 0,540       | 0,536 | 0,540 | 0,528 | 0,540 | 850—900                 | 0,636       | 0,641 | 0,582 | 0,536 | 0,624 |
| 250—300                 | 0,557       | 0,548 | 0,561 | 0,544 | 0,557 | 900—950                 | 0,645       | 0,649 | 0,628 | 0,590 | 0,628 |
| 300—350                 | 0,582       | 0,569 | 0,582 | 0,565 | 0,578 | 950—1000                | 0,636       | 0,649 | 0,636 | 0,599 | 0,636 |
| 350—400                 | 0,607       | 0,590 | 0,599 | 0,590 | 0,603 | 1000—1050               | 0,632       | 0,641 | 0,636 | 0,607 | 0,645 |
| 400—450                 | 0,636       | 0,619 | 0,632 | 0,615 | 0,632 | 1050—1100               | 0,632       | 0,641 | 0,645 | 0,615 | 0,653 |
| 450—500                 | 0,669       | 0,662 | 0,674 | 0,649 | 0,666 | 1100—1150               | 0,641       | 0,645 | 0,645 | 0,624 | 0,662 |
| 500—550                 | 0,720       | 0,703 | 0,720 | 0,695 | 0,703 | 1150—1200               | 0,641       | 0,649 | 0,653 | 0,632 | 0,669 |
| 550—600                 | 0,770       | 0,749 | 0,775 | 0,741 | 0,749 | 1200—1250               | 0,649       | 0,657 | 0,653 | 0,636 | 0,678 |
| 600—650                 | 0,825       | 0,791 | 0,812 | 0,779 | 0,783 | 1250—1300               | 0,649       | 0,662 | 0,662 | 0,645 | 0,687 |
| 650—700                 | 1,050       | 1,637 | 1,306 | 0,837 | 0,829 |                         |             |       |       |       |       |

Таблица IV-23

Плотность низколегированных сталей  $\rho$ , г/см<sup>3</sup>

| Марка стали | Температура, °C |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|             | 0               | 20    | 100   | 200   | 300   | 400   | 500   | 600   | 700   | 800   | 900   | 1000  |
| 15M         | 7,85            | 7,85  | 7,789 | 7,758 | 7,725 | 7,690 | 7,654 | 7,615 | —     | —     | —     | —     |
| 12MX        | 7,819           | 7,814 | 7,788 | 7,756 | 7,722 | 7,686 | 7,650 | 7,613 | 7,577 | —     | —     | —     |
| 15XM        | 7,85            | 7,85  | 7,790 | 7,758 | 7,725 | 7,690 | 7,656 | 7,622 | —     | —     | —     | —     |
| 15XФ        | 7,763           | 7,758 | 7,790 | 7,759 | 7,726 | 7,693 | 7,654 | 7,618 | 7,580 | —     | —     | —     |
| 30X         | 7,847           | 7,842 | 7,818 | 7,787 | 7,753 | 7,718 | 7,681 | 7,643 | 7,603 | 7,619 | 7,579 | 7,525 |
| 30H3        | 7,859           | 7,855 | 7,83  | 7,803 | 7,772 | 7,737 | 7,700 | 7,663 | 7,643 | 7,650 | 7,598 | 7,546 |
| 30XH3       | 7,851           | 7,845 | 7,824 | 7,793 | 7,760 | 7,727 | 7,693 | 7,657 | 7,625 | 7,650 | 7,596 | 7,522 |
| 12X5CMA     | 7,71            | 7,771 | 7,791 | —     | —     | —     | 7,679 | 7,649 | 7,619 | —     | —     | —     |
| X6M         | 7,75            | 7,75  | —     | 7,736 | 7,729 | 7,700 | 7,667 | 7,635 | 7,605 | —     | —     | —     |
| 30Г2        | 7,854           | 7,849 | 7,826 | 7,794 | 7,760 | 7,723 | 7,685 | 7,646 | 7,605 | 7,626 | 7,590 | 7,532 |
| 50C2Г       | 7,729           | 7,725 | 7,703 | 7,672 | 7,639 | 7,605 | 7,570 | 7,533 | 7,495 | 7,477 | 7,442 | 7,392 |

Таблица IV-24

Температуропроводность низколегированных сталей  $\alpha$ , м<sup>2</sup>/ч

| Интервал температур, °C | Марка стали |        |        |        |        | Интервал температур, °C | Марка стали |        |        |        |        |
|-------------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|-------------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|
|                         | 30X         | 30H3   | 30XH3  | 30Г2   | 50C2Г  |                         | 30X         | 30H3   | 30XH3  | 30Г2   | 50C2Г  |
| 50—100                  | 0,0440      | 0,0366 | 0,0330 | 0,0443 | 0,0259 | 600—650                 | 0,0187      | 0,0183 | 0,0190 | 0,0208 | 0,0180 |
| 100—150                 | 0,0425      | 0,0345 | 0,0328 | 0,0429 | 0,0266 | 650—700                 | 0,0165      | 0,0080 | 0,0110 | 0,0180 | 0,0165 |
| 150—200                 | 0,0396      | 0,0338 | 0,0324 | 0,0410 | 0,0266 | 700—750                 | 0,0090      | 0,0121 | 0,0115 | 0,0097 | 0,0162 |
| 200—250                 | 0,0378      | 0,0334 | 0,0317 | 0,0389 | 0,0266 | 750—800                 | 0,0137      | 0,0198 | 0,0220 | 0,0162 | 0,0090 |
| 250—300                 | 0,0360      | 0,0331 | 0,0302 | 0,0371 | 0,0263 | 800—850                 | 0,0198      | 0,0181 | 0,0194 | 0,0201 | 0,0191 |
| 300—350                 | 0,0335      | 0,0306 | 0,0295 | 0,0356 | 0,0252 | 850—900                 | 0,0200      | 0,0190 | 0,0200 | 0,0212 | 0,0194 |
| 350—400                 | 0,0310      | 0,0292 | 0,0284 | 0,0324 | 0,0245 | 900—950                 | 0,0209      | 0,0191 | 0,0205 | 0,0214 | 0,0198 |
| 400—450                 | 0,0284      | 0,0270 | 0,0266 | 0,0295 | 0,0234 | 950—1000                | 0,0212      | 0,0192 | 0,0205 | 0,0216 | 0,0200 |
| 450—500                 | 0,0259      | 0,0248 | 0,0241 | 0,0274 | 0,0219 | 1000—1050               | 0,0216      | 0,0209 | 0,0209 | 0,0219 | 0,0200 |
| 500—550                 | 0,0234      | 0,0223 | 0,0227 | 0,0249 | 0,0209 | 1050—1100               | 0,0200      | 0,0212 | 0,0212 | 0,0219 | 0,0205 |
| 550—600                 | 0,0209      | 0,0201 | 0,0209 | 0,0223 | 0,0198 |                         |             |        |        |        |        |

Таблица IV-25

Удельное сопротивление низколегированных сталей  $\rho_0 \cdot 10^6$ , Ом·см

| Марка стали | Температура, °C |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|             | 0               | 20   | 100  | 200  | 300  | 400  | 500  | 600   | 700   | 800   | 900   | 1000  | 1100  | 1200  | 1300  |
| 15ХФ        | —               | —    | 28,1 | 34,5 | 42,1 | 51,3 | 60,6 | 73,1  | 83,3  | —     | —     | —     | —     | —     | —     |
| 20Х         | 20,0            | 21,0 | 25,9 | 33,0 | 41,7 | 51,7 | 63,6 | 77,8  | 93,4  | 110,6 | 114,5 | 117,7 | 120,5 | 123,0 | 125,1 |
| 22ХН2       | —               | 33,0 | 36,0 | 43,0 | 52,0 | 59,0 | 67,0 | —     | —     | 105,0 | 112,0 | —     | —     | —     | —     |
| 22ХН3       | —               | 29,6 | —    | —    | —    | —    | 67,0 | —     | —     | 108,0 | 116,0 | —     | —     | —     | —     |
| 20ХН3       | —               | 24,0 | 29,0 | 36,0 | 46,0 | 56,0 | 66,0 | —     | —     | 110,0 | 123,0 | —     | —     | —     | —     |
| 30ХН3       | 25,6            | 26,8 | 31,7 | 38,7 | 46,9 | 56,7 | 68,1 | 81,7  | 98,1  | 111,5 | 114,8 | 117,8 | 120,1 | 122,5 | 124,6 |
| 20ХН4Ф      | —               | 36,0 | 41,0 | 48,0 | 56,0 | 64,0 | 72,0 | —     | 102,0 | 112,0 | 118,0 | —     | —     | —     | —     |
| 20ХН2Н4ВА   | —               | 41,0 | 44,0 | 50,0 | 58,0 | —    | 73,0 | 85,0  | 97,0  | 109,0 | 115,0 | —     | —     | —     | —     |
| 18Х2Н4ВА    | 19,7            | 20,8 | 25,9 | 33,3 | 42,1 | 52,3 | 64,5 | 78,6  | 94,6  | 110,3 | 114,3 | 117,4 | 120,2 | 122,7 | 125,0 |
| 30Г2        | —               | 24,6 | 27,4 | 33,6 | 40,6 | 50,0 | 59,8 | 71,5  | 96,2  | —     | —     | —     | —     | —     | —     |
| 12МХ        | —               | —    | 33,1 | 40,1 | 48,2 | 58,8 | 69,5 | 82,6  | 98,2  | —     | —     | —     | —     | —     | —     |
| 40Х3М       | —               | —    | 39,8 | 46,5 | 54,4 | 64,0 | 74,3 | 85,9  | 98,2  | —     | —     | —     | —     | —     | —     |
| 20Х3ФВМ     | —               | —    | 33,1 | 40,1 | 48,2 | 58,8 | 69,5 | 82,6  | 98,2  | —     | —     | —     | —     | —     | —     |
| 50С2Г       | 41,9            | 42,9 | 47,0 | 52,9 | 60,1 | 68,5 | 78,8 | 91,1  | 105,7 | 117,3 | 119,7 | 122,3 | 124,9 | 127,1 | 128,9 |
| 30Н3        | 25,9            | 27,1 | 32,0 | 39,0 | 47,0 | 56,7 | 67,9 | 81,94 | 99,2  | 112,2 | 114,9 | 118,0 | 120,4 | 122,8 | 124,8 |

Таблица IV-26

Средний коэффициент линейного расширения низколегированных сталей  $\beta \cdot 10^6$ , 1/°C, в интервале температур от 0 до t°C

| Марка стали | Температура, °C |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|             | —               | 50   | 100  | 200  | 300  | 400  | 500  | 600  | 700  | 800  | 900  | 1000 | 1100 | 1200 |
| 15ХМ        | —               | —    | 11,9 | 12,6 | 13,2 | 13,7 | 14,0 | 14,3 | —    | —    | —    | —    | —    | —    |
| 30ХМА       | —               | —    | 12,3 | 12,6 | —    | 14,5 | —    | 14,6 | —    | —    | —    | —    | —    | —    |
| 15ХФ        | —               | —    | 11,9 | 12,4 | 13,1 | 13,7 | 14,2 | 14,5 | 14,9 | —    | —    | —    | —    | —    |
| 30Х         | —               | 11,8 | 12,2 | 12,8 | 13,3 | 13,7 | 14,1 | 14,5 | 14,8 | 12,1 | 12,6 | 13,7 | 14,4 | 15,1 |
| 30ХН3       | —               | 10,9 | 11,4 | 12,3 | 12,8 | 13,2 | 13,4 | 13,7 | 13,7 | 10,7 | 12,0 | 13,1 | 14,0 | 14,7 |
| Х6М         | —               | 11,9 | 12,6 | 13,2 | 13,7 | 14,0 | 14,3 | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |
| 30Г2        | —               | 11,5 | 11,9 | 12,7 | 13,4 | 13,9 | 14,3 | 14,7 | 15,1 | 12,1 | 12,5 | 13,7 | 14,7 | 15,5 |
| 15М         | —               | —    | 12,0 | 12,6 | 13,2 | 13,7 | 14,2 | 14,7 | —    | —    | —    | —    | —    | —    |

Температура, °C

| Марка стали    | Температура, °C |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                | 50              | 100  | 200  | 300  | 400  | 500  | 600  | 700  | 800  | 900  |
| 12MX           | —               | 12,7 | 13,2 | 13,6 | 14,2 | 14,5 | 14,9 | 15,1 | —    | —    |
| 20XM           | —               | 11,8 | 12,5 | 13,0 | 13,6 | 14,0 | 14,3 | —    | —    | —    |
| 12XMФ          | —               | 13,6 | 13,7 | 14,0 | 14,2 | 14,5 | 14,7 | 14,8 | —    | —    |
| 10X2Ф          | —               | 12,2 | 12,7 | 13,0 | 13,5 | 13,8 | 14,2 | 14,5 | —    | —    |
| 10X2ФТ         | —               | 12,1 | 12,8 | 13,8 | 13,6 | 13,7 | 14,1 | 14,3 | —    | —    |
| 10X2ФМ         | —               | 13,6 | 13,7 | 14,0 | 14,2 | 14,5 | 14,7 | 14,8 | —    | —    |
| 10X2ФВ         | —               | 10,5 | 11,3 | 12,6 | 12,9 | 13,4 | 13,6 | 13,8 | —    | —    |
| 10X2МФ (ЭИ531) | —               | 13,6 | 13,7 | 14,0 | 14,2 | 14,5 | 14,7 | 14,8 | —    | —    |
| 10X2МБ         | —               | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |
| (ЭИ454)        | —               | 11,3 | 11,7 | —    | 13,9 | —    | 14,4 | —    | —    | —    |
| 25X2МФ         | —               | 11,0 | —    | —    | —    | 12,0 | 12,2 | 12,4 | —    | —    |
| (ЭИ10)         | —               | 11,2 | 12,2 | 12,9 | 13,4 | 13,7 | 14,1 | 14,4 | 13,6 | 13,7 |
| 12X5СМА        | —               | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |
| 50С21          | 10,6            | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |

Таблица IV-27

Теплофизические свойства некоторых низколегированных и легированных сталей

| Марка<br>стали    | Коэффициент линейного расширения $\beta \cdot 10^6$ ,<br>$1/^\circ\text{C}$ , в интервале температур, $^\circ\text{C}$ |                  |                  |                   | Теплоемкость<br>$c$ , кДж/(кг. $^\circ\text{C}$ ) | Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м. $^\circ\text{C}$ ), при темпера-<br>туре, $^\circ\text{C}$ |     |             |      |      |      | Кратчайшие точки, $^\circ\text{C}$ |           |              |            |            |          |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|-------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-------------|------|------|------|------------------------------------|-----------|--------------|------------|------------|----------|
|                   | 25—100                                                                                                                 | 20—200           | 20—400           | 20—600            |                                                   | 100                                                                                            | 200 | 300         | 400  | 500  | 600  | $A_{C_1}$                          | $A_{C_2}$ | $A_{r_1}$    | $A_{r_2}$  |            |          |
|                   |                                                                                                                        |                  |                  |                   |                                                   |                                                                                                |     |             |      |      |      |                                    |           |              |            |            |          |
| 40XФ              | 11,0                                                                                                                   | 12,0<br>(25—300) | 14,5<br>(25—600) | 16,5<br>(500—600) | —                                                 | —                                                                                              | —   | 352,3       | 48,7 | 45,4 | 41,9 | —                                  | —         | 754          | 790        | 702        | 746      |
| 30XM              | 12,3                                                                                                                   | 12,5             | 13,9             | 14,4              | —                                                 | —                                                                                              | —   | 451<br>(50) | —    | 38,4 | —    | —                                  | —         | 757          | 807        | 693        | 763      |
| 35XM }<br>35X2M } | 12,3                                                                                                                   | 12,5             | 13,9             | 14,4              | —                                                 | —                                                                                              | —   | 41,5        | 38,7 | 39,5 | 38,4 | —                                  | —         | { 745<br>715 | 820<br>776 | 620<br>607 | —<br>705 |

| Марка<br>стали                      | [Коэффициент линейного расширения в $10^{-6}$ ,<br>$1/^\circ\text{C}$ , в интервале температур, $^\circ\text{C}$ |                          |               |               | Теплоемкость<br>$c$ , кДж/(кг. $^\circ\text{C}$ ) |                     |                     |                     | Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м. $^\circ\text{C}$ ), при темпера-<br>туре, $^\circ\text{C}$ |               |              |               |               |               | Критические точки, $^\circ\text{C}$ |             |             |            |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|---------------|---------------|---------------------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|-------------------------------------|-------------|-------------|------------|
|                                     | 25—100                                                                                                           | 20—200                   | 20—400        | 20—600        |                                                   |                     |                     |                     | 100                                                                                            | 200           | 300          | 400           | 500           | 600           | $A_{c_1}$                           | $A_{c_2}$   | $A_{r_1}$   | $A_{r_2}$  |
|                                     |                                                                                                                  |                          |               |               |                                                   |                     |                     |                     |                                                                                                |               |              |               |               |               |                                     |             |             |            |
| 38XC<br>40XC                        | 11,7                                                                                                             | 12,7                     | 14,0          | 14,8          | —                                                 | —                   | —                   | —                   | —                                                                                              | 36,9          | 35,6         | 34,6          | —             | 33,6          | { 760<br>755                        | 860<br>850  | —           | —          |
|                                     |                                                                                                                  |                          |               |               |                                                   |                     |                     |                     |                                                                                                |               |              |               |               |               |                                     |             |             |            |
| 25CT<br>35CT                        | 11,5                                                                                                             | 12,6                     | 14,1          | 14,6          | —                                                 | —                   | —                   | —                   | —                                                                                              | 45,3          | 42,8         | 41,0          | —             | 36,4          | { 750<br>750                        | 860<br>830  | —           | —          |
|                                     |                                                                                                                  |                          |               |               |                                                   |                     |                     |                     |                                                                                                |               |              |               |               |               |                                     |             |             |            |
| 35XMF<br>25H, 30H                   | 11,3<br>12,2                                                                                                     | 11,7<br>12,2             | 13,9<br>13,8  | 14,3<br>14,4  | —<br>0,657<br>(380)                               | —<br>0,645<br>(424) | —<br>0,775<br>(535) | —<br>0,725<br>(900) | —<br>—                                                                                         | 41,8<br>50,3  | 41,0<br>48,6 | 40,8<br>46,0  | —<br>—        | 40,7<br>41,9  | 755<br>730                          | 835<br>820  | 600<br>660  | —<br>—     |
|                                     |                                                                                                                  |                          |               |               |                                                   |                     |                     |                     |                                                                                                |               |              |               |               |               |                                     |             |             |            |
| 12X2H4                              | 11,8<br>(100)                                                                                                    | 13,0<br>(200)            | 14,7<br>(400) | 15,6<br>(600) | 0,486<br>(70)                                     | 0,515<br>(280)      | 0,775<br>(535)      | 0,825<br>(900)      | —<br>—                                                                                         | —<br>—        | —<br>—       | 25,6<br>(500) | 20,9<br>(750) | 18,0<br>(910) | 710                                 | 820         | 660         | —<br>—     |
|                                     |                                                                                                                  |                          |               |               |                                                   |                     |                     |                     |                                                                                                |               |              |               |               |               |                                     |             |             |            |
| 18XHB<br>25XHB                      | 14,5<br>10,7                                                                                                     | 14,5<br>13,1             | 14,3<br>14,6  | 14,2<br>13,2  | —<br>0,465<br>(70)                                | —<br>0,735<br>(535) | —<br>0,825<br>(900) | —<br>0,770<br>(980) | —<br>—                                                                                         | 26,3          | —<br>—       | —<br>—        | 25,6<br>(950) | 23,0<br>(950) | 700<br>700                          | 810<br>720  | —<br>—      | —<br>—     |
|                                     |                                                                                                                  |                          |               |               |                                                   |                     |                     |                     |                                                                                                |               |              |               |               |               |                                     |             |             |            |
| ШХ9                                 | 13                                                                                                               | 13,9                     | 15            | 15,2          | 0,511<br>(45)                                     | 0,788<br>(525)      | —<br>—              | —<br>—              | —<br>—                                                                                         | —<br>—        | —<br>—       | —<br>—        | —<br>—        | —<br>—        | 730—<br>750                         | 875—<br>890 | 710—<br>690 | —<br>—     |
|                                     |                                                                                                                  |                          |               |               |                                                   |                     |                     |                     |                                                                                                |               |              |               |               |               |                                     |             |             |            |
| ШХ15                                | 14                                                                                                               | 15,1                     | 15,6          | 15,8          | 0,511<br>(45)                                     | 0,786<br>(525)      | —<br>—              | 0,428<br>(980)      | —<br>—                                                                                         | —<br>—        | —<br>—       | —<br>—        | —<br>—        | —<br>—        | 727                                 | 900         | 694         | —<br>—     |
|                                     |                                                                                                                  |                          |               |               |                                                   |                     |                     |                     |                                                                                                |               |              |               |               |               |                                     |             |             |            |
| X9C2<br>(CX8)<br>4X10C2M<br>(ЭИ107) | 11,1<br>10,0<br>(20—100)                                                                                         | 12,7<br>11,0<br>(20—800) | 14,3<br>—     | 14,2<br>—     | 0,473<br>(40)                                     | 0,490<br>(280)      | 0,913<br>(570)      | 0,859<br>(760)      | —<br>—                                                                                         | 18,4<br>(255) | —<br>—       | —<br>—        | 20,9<br>(560) | 20,9<br>(770) | 900<br>—<br>850                     | 970<br>950  | 810<br>700  | 870<br>845 |
|                                     |                                                                                                                  |                          |               |               |                                                   |                     |                     |                     |                                                                                                |               |              |               |               |               |                                     |             |             |            |

Примечание. В скобках приведены интервалы температур,  $^\circ\text{C}$ .

## Теплофизические свойства некоторых легированных конструкционных сталей

| Марка стали | Плотность<br>$\rho$ ,<br>г/см <sup>3</sup> | Коэффициент линейного расширения, $\beta \cdot 10^6$ , 1/°C, в интер-<br>вале температур, °C |        |        |                  |                 |                |        | Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·°C), при<br>температуре, °C |      |      |      |      |      |      | Критические точки, °C |                 |                 |                 |
|-------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|------------------|-----------------|----------------|--------|----------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|             |                                            |                                                                                              |        |        |                  |                 |                |        |                                                                            |      |      |      |      |      |      |                       |                 |                 |                 |
|             |                                            | 20—100                                                                                       | 20—200 | 20—300 | 20—400           | 20—500          | 20—600         | 20—700 | 20                                                                         | 100  | 200  | 300  | 400  | 500  | 600  | Ac <sub>1</sub>       | Ac <sub>3</sub> | Ar <sub>1</sub> | Ar <sub>3</sub> |
| 12Х2ФБ      | 7,815                                      | 11—54                                                                                        | 12—18  | 12—36  | 12—89            | 13—15           | 13—36          | 13—53  | —                                                                          | 38,2 | 38,2 | 36,8 | 34,8 | 33,2 | 31,4 | 875—<br>900           | 1000—<br>1050   | 850—<br>870     | 900—<br>91      |
| 38ХА и 40Х  | 7,82*                                      | 11,0*                                                                                        | 12,0*  | 12,2*  | 12,9*            | 13,5*           | —              | —      | —                                                                          | —    | —    | —    | —    | —    | —    | 747                   | 782             | 693             | 730             |
| 35ХМ        | 7,82                                       | 12,3                                                                                         | 12,6   | —      | 13,9             | —               | 14,6           | —      | —                                                                          | 40,6 | 39,8 | 38,5 | 37,3 | —    | —    | 745                   | 820             | 620             | —               |
| 35ХМФА      | 7,84                                       | 11,8                                                                                         | 12,5   | 12,7   | 13,0             | 13,4            | 13,7           | 14,0   | —                                                                          | 41,8 | 41,3 | 41,3 | 40,6 | —    | —    | 755—<br>775           | 835—<br>855     | 600             | —               |
| P2          | 7,82                                       | 10,90*                                                                                       | 12,00* | 12,70* | 13,65*           | 13,72*          | 13,82*         | 14,00* | —                                                                          | 35,6 | —    | —    | —    | —    | 26,3 | 770—<br>805           | 840—<br>880     | —               | —               |
| ЭИ723       | —                                          | 12,5                                                                                         | 12,9   | 12,3   | 18,7             | 14,0            | 14,7           | —      | —                                                                          | 27,2 | 25,8 | 21,8 | 20,1 | 19,3 | 17,1 | 780                   | 870             | 700             | 790             |
| ЭИ415       | 7,79                                       | —                                                                                            | —      | —      | 12,3—<br>12,6    | 12,75—<br>12,84 | 13,82          | —      | 38,5                                                                       | 35,6 | 33,0 | 31,4 | 30,6 | 29,8 | —    | 800—<br>830           | 900—<br>950     | 680—<br>700     | 790—<br>800     |
| 21Н5        | 7,84                                       | 10,9*                                                                                        | 11,8*  | —      | 12,45*           | —               | 12,8*          | —      | 29,3                                                                       | —    | —    | —    | —    | —    | —    | 675                   | 771             | —               | 660             |
| 40Н         | 7,84                                       | —                                                                                            | 11,7*  | 12,36* | 12,9*            | 13,52*          | 13,7*          | —      | —                                                                          | —    | —    | —    | —    | —    | —    | 655                   | —               | —               | —               |
| 40ХН        | 7,82                                       | 11,8                                                                                         | 12,3   | 13,4   | 14,0             | —               | —              | —      | —                                                                          | 44,0 | 42,6 | 41,0 | 39,0 | 37,2 | —    | 730                   | 770             | 660             | 700             |
| 34ХНЗМ      | 7,83                                       | 10,8                                                                                         | 11,6   | 13,3   | 13,7             | —               | —              | —      | —                                                                          | 41,0 | 37,7 | 34,0 | 30,6 | —    | —    | 720                   | 790             | —               | —               |
| 35ХНЗМФ     | 7,83                                       | 11,8                                                                                         | 12,1   | 12,6   | 13,0             | 14,4            | 13,7           | —      | —                                                                          | —    | —    | —    | —    | —    | —    | 725                   | 775             | —               | —               |
| 50ХФА       | 7,8                                        | 11,3*                                                                                        | 12,4*  | —      | 12,9*            | 13,35*          | 13,55*         | —      | —                                                                          | —    | —    | —    | —    | —    | —    | 752                   | 788             | 688             | 746             |
| 60С2        | 7,68                                       | (11—5—<br>12,4*)                                                                             | 12,8   | —      | (13,1—<br>13,9*) | 13,4            | 13,6—<br>14,5* | —      | —                                                                          | —    | —    | —    | —    | —    | —    | 750                   | 810—<br>820     | 700             | 770             |
| 38ХМЮА      | 7,71                                       | 12,27*                                                                                       | 13,14* | 13,31* | 13,49*           | 13,50*          | 13,81*         | —      | —                                                                          | —    | —    | —    | —    | —    | —    | 800                   | 940             | 730             | —               |

\* В интервале исследования от 25°С.

### 3. Хромистые нержавеющие стали

Таблица IV-29

Химический состав исследованных хромистых нержавеющих сталей\*

| Номер марки стали | Марка стали | Содержание, % |      |      |       |      |      |       | Режим термической обработки                                     | Температурный интервал исследования, °С | Характеристики свойств, приведенных в последующих таблицах |
|-------------------|-------------|---------------|------|------|-------|------|------|-------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------|
|                   |             | C             | Mn   | Si   | Cr    | Mo   | Ni   | V     |                                                                 |                                         |                                                            |
| 1                 | 1X13 (ЭЖ1)  | 0,11          | 0,36 | 0,33 | 13,6  | —    | —    | —     | Закалка от 1050°С в масло, отпуск при 720°С                     | 20—900                                  | β, λ, ρ <sub>s</sub>                                       |
| 1a                | 1X13 (ЭЖ1)  | 0,13          | 0,25 | 0,17 | 12,95 | —    | 0,14 | 0,012 | Нагрев до 960°С, выдержка 2 ч при 750°С и охлаждение на воздухе | 0—1200                                  | ρ, β, с, λ, ρ <sub>s</sub>                                 |
| 2                 | 2X13 (ЭЖ2)  | 0,17          | 0,40 | 0,35 | 13,2  | —    | —    | —     | Закалка от 1050°С в масло, отпуск при 720°С                     | 20—900                                  | λ, ρ <sub>s</sub> , β                                      |
| 3                 | 3X13 (ЭЖ3)  | 0,26          | 0,38 | 0,28 | 12,8  | —    | ≤0,6 | —     | Закалка от 1050°С в масло, отпуск при 720°С                     | 20—900                                  | ρ, β, λ, ρ <sub>s</sub>                                    |
| 3a                | 3X13 (ЭЖ3)  | 0,27          | 0,28 | 0,18 | 13,69 | 0,01 | 0,20 | 0,022 | Нагрев до 960°С, выдержка 2 ч при 750°С и охлаждение на воздухе | 0—1200                                  | ρ, β, λ, ρ <sub>s</sub> , с                                |
| 4                 | 4X13 (ЭЖ4)  | 0,36          | 0,51 | 0,52 | 13,29 | —    | ≤0,6 | —     | Закалка от 1050°С в масло, отпуск при 720°С                     | 20—900                                  | ρ, β, λ, ρ <sub>s</sub>                                    |
| 5                 | X17 (ЭЖ17)  | ≤0,12         | ≤0,7 | ≤0,9 | 16—18 | —    | ≤0,6 | —     |                                                                 | 20—700                                  | ρ, β, λ                                                    |
| 6                 | X28 (ЭЖ27)  | ≤0,20         | ≤0,8 | ≤1,2 | 26—28 | —    | ≤0,6 | —     |                                                                 | 20—1000                                 | ρ, β, λ                                                    |

\* Марка обозначена не по ГОСТу, а по химическому составу стали.

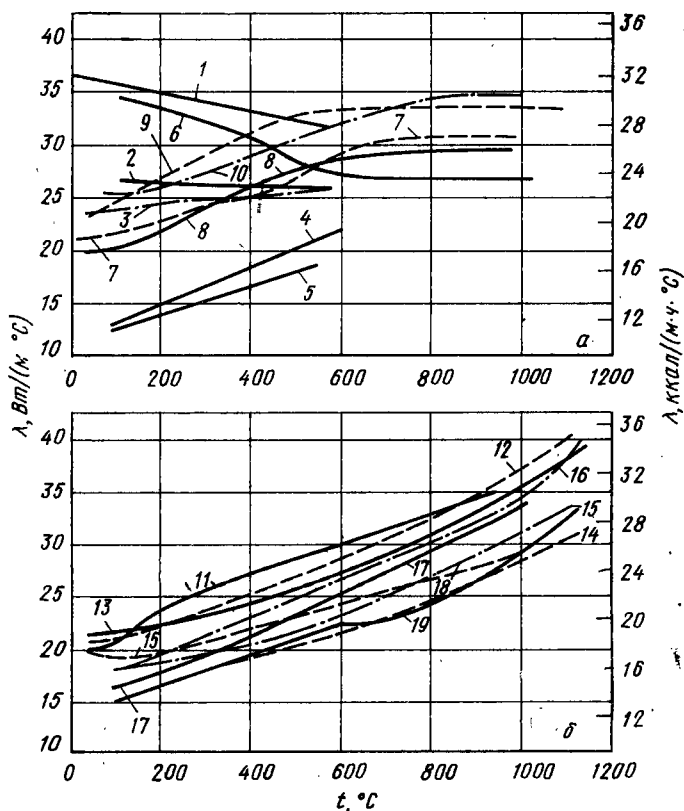


Рис. 24. Зависимость коэффициентов теплопроводности  $\lambda$  хромистых и хромоникелевых сталей от температуры  $t$

Состав исследованных металлов

| Кривая на рис. 24 | Марка стали   | Содержание, % |      |      |       |       |               |
|-------------------|---------------|---------------|------|------|-------|-------|---------------|
|                   |               | C             | Si   | Mn   | Ni    | Cr    | прочие        |
| 1                 | 10X5          | 0,10          | 0,18 | 0,45 | —     | 5,15  | —             |
| 2                 | 08X15         | 0,08          | 0,20 | 0,35 | 0,05  | 15,19 | —             |
| 3                 | 41X15H        | 0,14          | 0,12 | 0,19 | 0,70  | 14,60 | —             |
| 4                 | X20H80        | —             | —    | —    | 80,0  | 20,0  | —             |
| 5                 | X16H61        | —             | —    | —    | 61,0  | 16,0  | 23 Fe         |
| 6                 | X5            | 0,01          | 0,02 | 0,04 | —     | 4,96  | —             |
| 7                 | 44X9C4ГФ      | 0,44          | 3,36 | 0,85 | —     | 8,82  | 0,2 V         |
| 8                 | 41X2C4        | 0,41          | 4,33 | 0,33 | —     | 2,05  | —             |
| 9                 | 39X2C3        | 0,39          | 3,36 | 0,48 | —     | 2,05  | —             |
| 10                | 45X3C4K       | 0,45          | 3,62 | 0,36 | —     | 2,91  | 1,40 Co       |
| 11                | 07X20K26      | 0,07          | 0,51 | 0,42 | —     | 20,47 | 26,0 Co       |
| 12                | 15X30H2CG     | 0,15          | 0,84 | 0,80 | 1,73  | 27,93 | —             |
| 13                | 19X25H4C      | 0,19          | 0,50 | 0,51 | 4,22  | 24,5  | —             |
| 14                | 12X23H20C3Г2  | 0,12          | 2,38 | 1,4  | 20,30 | 22,75 | —             |
| 15                | 48X13H12B3CG  | 0,48          | 1,22 | 1,44 | 12,33 | 12,85 | 2,88 W        |
| 16                | 53X13H12B10CG | 0,53          | 1,07 | 1,17 | 11,90 | 13,34 | 9,92 W        |
| 17                | 12X17H63Г     | 0,12          | 0,51 | 1,0  | 62,85 | 16,95 | —             |
| 18                | 09X13H83CG    | 0,09          | 0,75 | 0,88 | 82,25 | 12,98 | Ос-тальное Fe |
| 19                | 04X20H75CG    | 0,04          | 1,13 | 0,81 | 75,15 | 19,93 | —             |

Примечание. Марки стали обозначены по химическому составу.

Т а б л и ц а IV-30

Критические точки фазовых превращений сталей X13, 2X13, 3X13 и 4X13, °C

| Марка стали | $A_{c1}$ | $A_{c2}$ | $A_{r1}$ | $A_{r2}$ | Марка стали | $A_{c1}$ | $A_{c2}$ | $A_{r1}$ | $A_{r2}$ |
|-------------|----------|----------|----------|----------|-------------|----------|----------|----------|----------|
| X13         | 820      | 855      | 750      | 780      | 3X13        | 800      | 835      | 710      | 770      |
| 2X13        | 825      | 870      | 750      | 795      | 4X13        | 800      | 835      | 700      | 765      |

Т а б л и ц а IV-31

Коэффициент теплопроводности хромистых нержавеющей сталей  $\lambda$ , Вт/(м·°C), при различной температуре

| Номер марки стали | Марка | Температура, °C |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |
|-------------------|-------|-----------------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|
|                   |       | 20              | 100  | 200  | 300  | 400  | 500  | 600  | 700   | 800  | 900  | 1000 | 1100 | 1200 |
| 1a                | X13   | 26,7            | 27,7 | 27,7 | 28,0 | 27,7 | 27,2 | 26,4 | 25,5  | 25,1 | 26,7 | 27,7 | 28,8 | 30,5 |
| 1б                | X13   | 27,3            | 32,7 | 26,4 | 26,1 | 26,1 | 26,3 | 26,7 | 27,2  | —    | —    | —    | —    | —    |
| 2                 | 2X13  | 24,3            | 25,5 | 25,8 | 26,3 | 26,4 | 26,6 | 26,4 | 26,2  | 26,7 | 27,6 | —    | —    | —    |
| 2б                | 2X13  | 20,5            | 22,1 | 23,6 | 24,7 | 25,6 | 26,2 | 26,7 | 27,3  | 27,9 | 28,5 | —    | —    | —    |
| 3a                | 3X13  | 25,1            | 26,4 | 27,2 | 27,7 | 27,7 | 27,2 | 26,7 | 25,6  | 25,1 | 26,7 | 27,7 | 28,8 | 30,1 |
| 3б                | 3X13  | —               | 25,1 | 25,6 | 25,6 | 25,6 | 25,6 | 25,6 | 24,7  | —    | —    | —    | —    | —    |
| 4                 | 4X13  | 28,8            | 28,0 | 29,1 | 29,3 | 29,2 | 28,8 | 28,4 | 28,0  | —    | —    | —    | —    | —    |
| 5                 | X17   | —               | 24,4 | —    | —    | —    | —    | —    | —     | —    | —    | —    | —    | —    |
| 6                 | X28   | —               | 20,9 | 21,7 | 22,7 | 22,7 | 23,4 | 24,3 | 25,00 | —    | —    | —    | —    | —    |

Таблица IV-32

Средняя теплоемкость хромистых нержавеющих сталей  $c_{ср}$ , кДж/(кг·°C), в интервале температур от 50 до t°С (рис. 25)

|                   |             | Температура, °С |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------|-------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Номер марки стали | Марка стали | 100             | 200   | 300   | 400   | 500   | 600   | 700   | 800   | 900   | 1000  | 1100  | 1200  | 1300  |
| 1а                | 1X13        | 0,469           | 0,498 | 0,515 | 0,536 | 0,535 | 0,599 | 0,636 | 0,657 | 0,666 | 0,666 | 0,666 | 0,662 | 0,662 |
| 2а                | 2X13*       | —               | —     | 0,511 | 0,532 | 0,548 | 0,574 | —     | —     | —     | —     | —     | —     | —     |
| 3а                | 3X13        | 0,469           | 0,498 | 0,511 | 0,532 | 0,561 | 0,595 | 0,641 | 0,674 | 0,691 | 0,682 | 0,682 | 0,678 | 0,678 |

\* Значения  $c_{ср}$  в интервале температур от 20 до t°С.

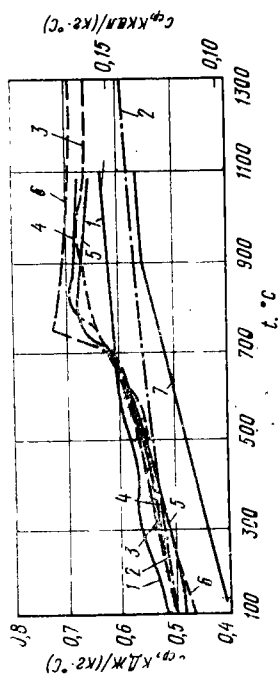


Рис. 25. Зависимость средней теплоемкости  $c_{ср}$  сталей от температуры: 1 — 1X13; 2 — хромоникелевая аустенитная; 3 — армко-железо; 4 — 50Cr2; 5 — 30Cr2; 6 — углеродистая (1,2% C); 7 — P18

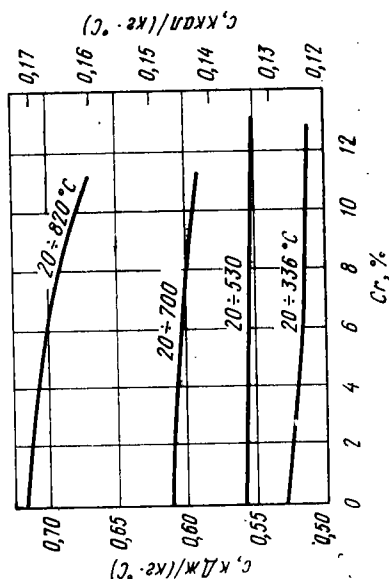


Рис. 26. Зависимость удельной теплоемкости  $c$  хромистых сталей от содержания хрома

Таблица IV-33

Плотность хромистых нержавеющей сталей  $\rho$ , г/см<sup>3</sup>

| Номер марки стали |      | Температура, °С |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------|------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                   |      | 0               | 20    | 100   | 200   | 300   | 400   | 500   | 600   | 700   | 800   | 900   | 1000  | 1100  |
| 1                 | X13  | 7,724           | 7,719 | 7,700 | 7,663 | 7,644 | 7,612 | 7,583 | 7,553 | 7,520 | 7,485 | —     | —     | —     |
| 1a                | X13  | 7,677           | 7,672 | 7,654 | 7,626 | 7,598 | 7,569 | 7,539 | 7,492 | 7,476 | 7,445 | —     | —     | —     |
| 2                 | 2X13 | 7,674           | 7,669 | 7,651 | 7,623 | 7,595 | 7,566 | 7,535 | 7,491 | 7,473 | 7,440 | —     | —     | —     |
| 3                 | 3X13 | 7,652           | 7,648 | 7,630 | 7,602 | 7,573 | 7,544 | 7,512 | 7,483 | 7,450 | 7,442 | —     | —     | —     |
| 3a                | 3X13 | 7,749           | 7,745 | 7,725 | 7,700 | 7,671 | 7,642 | 7,611 | 7,580 | 7,548 | 7,515 | —     | —     | —     |
| 4                 | 4X13 | 7,745           | 7,741 | 7,722 | 7,696 | 7,667 | 7,638 | 7,608 | 7,575 | 7,542 | 7,519 | 7,523 | 7,477 | 7,425 |
| 5                 | X17  | 7,720           | 7,700 | —     | —     | —     | —     | 7,590 | 7,570 | 7,540 | 7,500 | 7,524 | 7,463 | 7,397 |
| 6                 | X28  | 7,650           | 7,630 | —     | —     | —     | —     | 7,520 | 7,490 | 7,460 | 7,430 | —     | —     | —     |

Таблица IV-34

Удельное электросопротивление хромистых нержавеющей сталей  $\rho_{\text{э}} \cdot 10^6$ , Ом·см, при различной температуре

| Номер марки<br>стали | Марка<br>стали | Температура, °C |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------|----------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                      |                | 0               | 20   | 100  | 200  | 300  | 400  | 500  | 600   | 700   | 800   | 900   | 1000  | 1100  | 1200  | 1300  |
| 1а                   | X13            | 48,6            | 50,6 | 58,4 | 67,9 | 76,9 | 85,4 | 93,8 | 102,1 | 110,3 | 116,0 | 115,0 | 117,0 | 119,0 | 121,6 | 125,3 |
| 2                    | 2X13           | —               | 58,8 | 65,3 | 73,0 | 80,0 | 88,4 | 95,2 | 102,2 | 110,2 | 114,1 | —     | —     | —     | —     | —     |
| 3а                   | 3X13           | 50,3            | 52,2 | 59,5 | 68,4 | 76,9 | 85,8 | 93,5 | 101,5 | 109,9 | 115,7 | 114,6 | 117,9 | 120,9 | 122,9 | 125,0 |
| 4                    | 4X13           | —               | 59,1 | 64,6 | 71,4 | 78,8 | 86,4 | 94,0 | 100,5 | 108,0 | —     | —     | —     | —     | —     | —     |

Таблица IV-35

## Теплофизические свойства некоторых нержавеющих, жаростойких и жаропрочных сталей

| Марка стали | Плотность<br>$\rho$ , г/см <sup>3</sup> | Коэффициент линейного расширения $\beta$ 10 <sup>-6</sup> , 1/°C, при температуре, °C |        |        |        |                            |                |        |        | Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·°C), при температуре, °C |              |      |      |      |      |      |      |
|-------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|----------------------------|----------------|--------|--------|-------------------------------------------------------------------------|--------------|------|------|------|------|------|------|
|             |                                         | Коэффициент линейного расширения $\beta$ 10 <sup>-6</sup> , 1/°C, при температуре, °C |        |        |        |                            |                |        |        | Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·°C), при температуре, °C |              |      |      |      |      |      |      |
|             |                                         | 20—100                                                                                | 20—200 | 20—300 | 20—400 | 20—500                     | 20—600         | 20—700 | 20—800 | 100                                                                     | 200          | 300  | 400  | 500  | 600  | 700  | 800  |
| 4X13        | 7,68                                    | 10,3*                                                                                 | 10,7   | —      | 11,5*  | 11,8*—<br>12,0<br>(25—550) | —              | —      | —      | 27,6                                                                    | 28,8         | 29,3 | 28,8 | 28,5 | 28,0 | —    | —    |
| 1X11MФ      | —                                       | —                                                                                     | —      | —      | —      | 11,5—<br>12,0<br>(25—550)  | —              | —      | —      | —                                                                       | —            | —    | —    | —    | —    | —    | —    |
| (15X11MФ)   | 7,85                                    | —                                                                                     | 10,5*  | —      | —      | 11,2*<br>(25—550)          | 11,4—<br>12,0* | —      | —      | 24,8                                                                    | 25,6         | 26,0 | 26,3 | 26,7 | 27,2 | 27,2 | 27,6 |
| 1X12ВНМФ    | 7,83                                    | 10,8                                                                                  | —      | —      | —      | —                          | 13,5—<br>14,0  | —      | —      | —                                                                       | —            | —    | —    | —    | —    | —    | —    |
| (ЭИ802)     | —                                       | —                                                                                     | —      | —      | —      | —                          | —              | —      | —      | —                                                                       | —            | —    | —    | —    | —    | —    | —    |
| 1X12В2МФ    | —                                       | —                                                                                     | —      | —      | —      | —                          | —              | —      | —      | —                                                                       | —            | —    | —    | —    | —    | —    | —    |
| (ЭИ756)     | —                                       | —                                                                                     | —      | —      | —      | —                          | —              | —      | —      | —                                                                       | —            | —    | —    | —    | —    | —    | —    |
| 1X14Н18В2Б  | —                                       | —                                                                                     | —      | —      | —      | —                          | —              | —      | —      | —                                                                       | —            | —    | —    | —    | —    | —    | —    |
| (ЭИ695)     | 8,1                                     | 16,7                                                                                  | 17,5   | 17,5   | 18,15  | 18,28                      | 18,3           | 18,6   | 20,1   | 15,5                                                                    | 17,2         | 18,4 | 20,1 | 21,7 | 23,0 | 24,6 | —    |
| X23Н18      | —                                       | —                                                                                     | —      | —      | —      | —                          | —              | —      | —      | —                                                                       | —            | —    | —    | —    | —    | —    | —    |
| (ЭИ417)     | 7,88                                    | —                                                                                     | —      | —      | 16,3   | 16,4                       | 16,85          | 17,85  | —      | 15,9                                                                    | 13,8<br>(20) | —    | —    | —    | —    | —    | —    |
| ЭИ123       | 7,87                                    | —                                                                                     | 16,1   | 16,7   | 17,2   | 17,4                       | 17,8           | 18,2   | —      | —                                                                       | —            | —    | —    | —    | —    | —    | —    |
| ЭХ19Н9МВБТ  | —                                       | —                                                                                     | —      | —      | —      | —                          | —              | —      | —      | —                                                                       | —            | —    | —    | —    | —    | —    | —    |
| (ЭИ572)     | 7,96                                    | —                                                                                     | —      | —      | 16,02  | 16,37                      | 16,75          | 16,97  | 17,94  | 15,1                                                                    | 16,3         | 18,4 | 20,1 | 21,7 | 23,4 | 25,1 | —    |
| ЭИ400       | 7,97                                    | 14,8                                                                                  | 16,1   | 16,7   | 17,2   | 17,6                       | 17,9           | 18,2   | —      | 19,7                                                                    | 20,5         | 21,3 | 23,0 | 24,3 | 25,1 | —    | —    |
| ЭИ403       | 7,93                                    | —                                                                                     | —      | —      | 17,6   | 17,8                       | 18,2           | 18,7   | —      | 19,7                                                                    | 20,5         | 21,3 | 23,0 | 24,3 | 25,1 | —    | —    |
| ЭИ405       | 7,96                                    | —                                                                                     | —      | —      | 17,1*  | 17,4*                      | 17,8*          | 18,2*  | 18,6*  | 15,5                                                                    | 17,2         | 18,4 | 20,1 | 21,7 | 23,0 | 24,6 | —    |

| Марка стали             | Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | Коэффициент линейного расширения $\beta \cdot 10^6$ , 1/°C, при температуре, °C |        |                  |                  |                  |                  |                          |        | Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·°C), при температуре, °C |      |      |      |      |      |   |
|-------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|--------|------------------|------------------|------------------|------------------|--------------------------|--------|-------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|---|
|                         |                                      | 20—100                                                                          | 20—200 | 20—300           | 20—400           | 20—500           | 20—600           | 20—700                   | 20—800 |                                                                         |      |      |      |      |      |   |
|                         |                                      | 100                                                                             | 200    | 300              | 400              | 500              | 600              | 700                      | 800    |                                                                         |      |      |      |      |      |   |
| ЭИ395                   | 8,07                                 | 15,1                                                                            | 15,3   | 15,3             | 15,6—<br>16,2    | 15,7—<br>16,6    | 16,1—<br>16,9    | 17,1                     | —      | 10,1                                                                    | 11,7 | 14,2 | 17,2 | 20,9 | 25,1 | — |
| ЭИ424                   | 7,94                                 | —                                                                               | —      | —                | 16,1             | 16,7             | 16,9             | 17,5                     | —      | 14,2                                                                    | 15,9 | 17,2 | 18,8 | 20,1 | 21,7 | — |
| ХН35ВТ (ЭИ612)          | 8,164                                | —                                                                               | —      | 15,15—<br>16,05* | 15,46—<br>16,40* | 15,61—<br>16,50* | 16,13—<br>17,00* | 16,62—<br>17,35*<br>17,7 | —      | 13,4                                                                    | 15,5 | 17,2 | 18,8 | 20,5 | 22,2 | — |
| ХН10К (ЭИ434)           | 8,20                                 | —                                                                               | —      | —                | 15,55—<br>17,5   | 16,4—<br>17,5    | 16,6—<br>17,6    | 17,2—<br>17,7            | 17,4   | 13,4                                                                    | 15,1 | 17,2 | 18,8 | 20,5 | 22,2 | — |
| 4Х15Н7Г1Ф2МС<br>(ЭИ388) | 7,79                                 | —                                                                               | —      | —                | 17,5             | 17,8             | 18,3             | 18,5                     | —      | —                                                                       | 24,7 | 28,5 | 30,9 | 34,3 | 38,0 | — |
| ХН80Т (ЭИ437)           | 8,2                                  | —                                                                               | —      | —                | 12,6             | 13,3             | 13,9             | 14,6                     | —      | —                                                                       | 13,8 | —    | 16,7 | 18,4 | 20,9 | — |
| ХН80БЮ (ЭИ607)          | 8,3                                  | —                                                                               | —      | 13,1*            | 14,0*            | 14,45*           | 14,9*            | 15,6*                    | 16,35* | 13,4                                                                    | 15,5 | 18,0 | 20,0 | 22,2 | 24,3 | — |

Примечание. В скобках приведены интервалы температур, °C.

\* В интервале температур от 25°C.

# 4. Хромоникелевые аустенитные стали

Таблица IV-36

Химический состав исследованных хромоникелевых аустенитных сталей

| Номер марки стали | Марка стали             | Содержание, % |         |         |       |      |       |                 | Характеристики, приведенные в последующих таблицах | Температура интервала исследования, °С |
|-------------------|-------------------------|---------------|---------|---------|-------|------|-------|-----------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------|
|                   |                         | C             | Mn      | Si      | Cr    | Mo   | Ni    | другие элементы |                                                    |                                        |
| 1                 | X18H9 (ЭЯ1)             | 0,14          | 2,0     | 0,8     | 17—20 | —    | 8—11  | —               | р, β                                               | 0—400                                  |
| 1а                | X18H9                   | 0,08—0,20     | 2,0     | 1,0     | 17—19 | —    | 8—10  | —               | β, λ                                               | 0—1000                                 |
| 1б                | X18H9*                  | 0,15          | 0,26    | 0,9     | 17—20 | —    | 8—10  | —               | λ, р <sub>э</sub>                                  | 20—800                                 |
| 1в                | X18H9*                  | 0,08          | 2,0     | 1,0     | 18—20 | —    | 8—10  | —               | β, λ                                               | 0—1000                                 |
| 2                 | 2X18H9 (ЭЯ2)            | 0,15—0,20     | 0,3—0,7 | 0,8     | 17—19 | —    | 8—9,5 | —               | λ, р <sub>э</sub>                                  | 20—900                                 |
| 3                 | 1X18H9T (ЭЯ1Т)          | 0,09          | 0,88    | 0,74    | 18,1  | —    | 9,82  | Ti 0,45         | β, λ, р <sub>э</sub>                               | 20—900                                 |
| 3а                | 1X8H9T                  | 0,14          | 0,7     | 1,2     | 17—20 | —    | 8—11  | Ti 0,5          | р, β, λ                                            | 0—900                                  |
| 3б                | 1X18H8T                 | 0,14          | 0,57    | 0,8     | 17,5  | —    | 8,75  | Ti 0,78         | λ, р <sub>э</sub>                                  | 20—700                                 |
| 3в                | 1X18H9T                 | 0,08          | 2,0     | 1,0     | 17—19 | —    | 8—11  | Ti < 0,4        | β, λ                                               | 0—1000                                 |
| 4                 | X18H9B*                 | 0,08          | 0,37    | 0,68    | 19,1  | —    | 8—14  | W 0,60          | р, β, с, λ, р <sub>э</sub>                         | 0—1200                                 |
| 5                 | X18H9M*                 | 0,15          | 2,0     | 1,0     | 17—19 | 0,60 | 8—10  | —               | β, λ                                               | 0—1000                                 |
| 6                 | X18H9C2*                | 0,08—0,20     | 2,0     | 2,0—3,0 | 17—19 | —    | 8—10  | —               | β, λ                                               | 0—1000                                 |
| 7                 | 0X18H12B (ЭИ398, ЭИ402) | 0,08          | 2,0     | 1,0     | 17—19 | —    | 9—12  | Nb ≤ 0,8        | β, λ                                               | 0—1000                                 |
| 7а                | X18H11B*                | 0,1           | 0,8     | 0,3     | 19,0  | —    | 14,0  | Nb 1,7          | λ, р <sub>э</sub>                                  | 20—800                                 |
| 8                 | 4X14H14B2M (ЭИ69)       | 0,47          | 0,47    | 0,68    | 13,6  | 0,54 | 14,5  | W 2,24          | λ, р <sub>э</sub>                                  | 20—700                                 |
| 9                 | 1X14H14B2M (ЭИ257)      | 0,10          | 0,43    | 0,59    | 15,3  | 0,72 | 12,3  | W 2,76          | р, β, λ                                            | 20—900                                 |
| 9а                | 1X14H14B2M (ЭИ257)      | 0,10          | 0,43    | 0,59    | 15,3  | 0,72 | 12,3  | W 2,76          | р <sub>э</sub>                                     | 20—900                                 |
| 10                | 1X14H18M3T              | 0,10          | 0,5     | 0,6     | 14,0  | 3,5  | 18    | Ti 0,75         | р, р, λ, р <sub>э</sub>                            | 20—800                                 |
| 11                | X18H12                  | 0,12          | 2,0     | 1,0     | 17—19 | —    | 10—13 | —               | λ, р                                               | 0—1000                                 |
| 12                | X2H11*                  | 0,08          | 2,0     | 1,0     | 19—21 | —    | 10—12 | —               | β, λ                                               | 0—1000                                 |
| 13                | X23H13 (ЭИ319)          | 0,20          | 2,0     | 1,0     | 22—25 | —    | 12—45 | —               | β, λ                                               | 0—1000                                 |
| 13а               | X23H13 (ЭИ319)          | 0,20          | 2,0     | 1,0     | 22—24 | —    | 12—15 | —               | р, β, λ                                            | 0—1000                                 |
| 14                | 2X25H20                 | 0,25          | 2,0     | 1,5     | 24—26 | —    | 19—22 | —               | β, λ                                               | 0—1000                                 |
| 15                | X18H25C2 (ЭЯ3С)         | 0,3—0,35      | 0,7     | 2—3     | 16—20 | —    | 23—26 | —               | р, β, λ                                            | 10—700                                 |
| 15а               | X18H25C2 (ЭЯ3С)         | 0,42          | 0,63    | 2,79    | 18,0  | —    | 21,5  | —               | λ, р <sub>э</sub>                                  | 20—900                                 |
| 16                | X20H14C2 (ЭИ211)        | 0,20          | 0,7—1,2 | 2—3     | 19—22 | —    | 13—15 | —               | р, β, λ                                            | 0—1000                                 |
| 17                | X25H20C2 (ЭИ283)        | 0,20          | 0,2—0,7 | 2—3     | 24—27 | —    | 18—21 | W 2,5           | р, β, λ                                            | 0—1000                                 |
| 18                | X13H25M2B2              | 0,4           | 0,8     | 1,5     | 13,0  | 2,0  | 25,0  | —               | λ, р <sub>э</sub>                                  | 20—800                                 |
| 19                | X7H25 (ЭИ25)            | 0,45          | 0,38    | 0,33    | 7,12  | —    | 25    | —               | λ, р <sub>э</sub>                                  | 20—900                                 |
| 20                | X2H35 (ЭИ36)            | 0,12          | 0,35    | 0,14    | 1,8   | —    | 35    | —               | λ, р <sub>э</sub>                                  | 20—900                                 |
| 21                | H28                     | 0,28          | 0,89    | 0,15    | Следы | —    | 28,37 | —               | р, β, с, λ, р <sub>э</sub>                         | 0—1200                                 |

Примечание. Режим термической обработки для сталей марки X18H9B — аустенитизация при 1100°С, для сталей марки 1X14H14B2M (ЭИ257) — аустенитизация при 1150°С (9а) или стабилизация при 800°С, 10 ч. (9).

\* Марка обозначена не по ГОСТу, а по химическому составу стали.

Таблица IV-37

Теплопроводность хромоникелевых аустенитных сталей  $\lambda$ , Вт/(м·°С)

| Номер марки<br>стали | Марка                     | Температура, °C |      |      |      |      |      |      |      |      |        |      |      |      |      |
|----------------------|---------------------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|------|------|------|------|
|                      |                           | 0               | 20   | 100  | 200  | 300  | 400  | 500  | 600  | 700  | 800    | 900  | 1000 | 1100 | 1200 |
| 1а                   | X18H9 (ЭН1)               | —               | —    | 16,3 | 17,9 | 18,8 | 20,1 | 21,5 | —    | —    | —      | —    | —    | —    | —    |
| 1б                   | X18H9                     | —               | —    | 16,3 | 17,6 | 18,8 | 20,5 | 21,7 | 23,4 | 24,7 | 26,9   | —    | —    | —    | —    |
| 1в                   | X18H9                     | —               | —    | 16,3 | —    | —    | —    | 21,5 | —    | —    | —      | —    | —    | —    | —    |
| 2                    | 2X18H9 (ЭН2)              | —               | 17,6 | 18,7 | 19,9 | 21,1 | 22,2 | 23,4 | 24,5 | 25,8 | 26,9   | 28,1 | —    | —    | —    |
| 3                    | 1X18H9T (ЭН1Т)            | —               | —    | 16,0 | 17,6 | 19,2 | 20,8 | 22,3 | 23,8 | 25,5 | 27,6   | —    | —    | —    | —    |
| 3а                   | 1X18H9T (ЭН1Т)            | —               | —    | 16,2 | —    | 19,1 | 21,1 | 22,1 | 23,7 | —    | 25,2   | 26,9 | —    | —    | —    |
| 3б                   | 1X18H9T (ЭН1Т)            | 13,1            | —    | 15,6 | 17,6 | 19,4 | 21,1 | 22,3 | 23,6 | 24,8 | —      | —    | —    | —    | —    |
| 3в                   | 1X18H9T (ЭН1Т)            | —               | —    | 16,0 | 17,7 | 19,2 | 20,6 | 22,1 | —    | —    | —      | —    | —    | —    | —    |
| 4                    | X18H98                    | 15,9            | —    | 16,3 | 17,2 | 18,4 | 20,1 | 21,7 | 23,8 | 25,6 | 26,7   | 26,7 | 28,0 | 28,8 | 29,7 |
| 5                    | X18H9M                    | —               | —    | 16,3 | —    | —    | —    | 21,5 | —    | —    | —      | —    | —    | —    | —    |
| 6                    | X18H8C2                   | —               | —    | 15,9 | —    | —    | —    | 21,6 | —    | —    | —      | —    | —    | —    | —    |
| 7                    | X18H118<br>(ЭИ398, ЭИ402) | —               | —    | 16,0 | 17,7 | 19,2 | 20,6 | 22,1 | —    | —    | —      | —    | —    | —    | —    |
| 7а                   | X18H116                   | —               | —    | 15,0 | 16,7 | 18,4 | 20,1 | 21,7 | 23,5 | 25,1 | 26,7   | —    | —    | —    | —    |
| 8                    | 4X14H14B2M<br>(ЭИ69)      | 13,8            | —    | 15,5 | 16,9 | 19,2 | 20,2 | 21,2 | 21,9 | —    | —      | —    | —    | —    | —    |
| 9                    | 1X14H14B2M<br>(ЭИ257)     | —               | —    | 15,6 | 17,1 | 18,7 | 20,1 | 21,6 | 22,9 | 24,3 | 25,9   | 26,9 | —    | —    | —    |
| 9а                   | 1X14H14B2M<br>(ЭИ257)     | —               | 14,8 | 15,4 | 16,0 | 17,1 | 18,1 | 19,9 | 21,5 | 23,4 | 25,6   | 26,9 | —    | —    | —    |
| 10                   | 1X14H18M3T                | —               | —    | 14,2 | 15,9 | 18,0 | 19,7 | 21,4 | 22,6 | 24,2 | 25,9   | 27,2 | —    | —    | —    |
| 11                   | X18H112                   | —               | —    | 16,3 | —    | —    | —    | 21,5 | —    | —    | —      | —    | —    | —    | —    |
| 12                   | X20H11                    | —               | —    | 15,2 | —    | —    | —    | 21,6 | —    | —    | —      | —    | —    | —    | —    |
| 13                   | X23H13 (ЭИ319)            | —               | —    | 13,3 | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —      | —    | —    | —    | —    |
| 13а                  | X23H13 (ЭИ319)            | —               | —    | 13,8 | —    | —    | —    | 18,7 | —    | —    | —      | —    | —    | —    | —    |
| 14                   | 2X25H20                   | —               | —    | 13,8 | 14,2 | 15,2 | 16,5 | 18,7 | —    | —    | —      | —    | —    | —    | —    |
| 15                   | X18H2502<br>(ЭЯ3С)        | —               | —    | 15,1 | —    | —    | —    | 22,7 | 24,7 | 26,2 | (27,9) | —    | —    | —    | —    |
| 15а                  | X18H25C2<br>(ЭЯ3С)        | —               | —    | 17,4 | 19,2 | —    | —    | 26,7 | 28,8 | 30,8 | 30,8   | —    | —    | —    | —    |
| 16                   | X20H14C2<br>(ЭИ211)       | —               | —    | 13,4 | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —      | —    | —    | —    | —    |
| 17                   | X25H20C2<br>(ЭИ283)       | —               | —    | 14,7 | —    | —    | —    | 21,6 | 23,5 | 25,1 | 26,9   | 28,8 | —    | —    | —    |
| 18                   | X13H25M2                  | —               | —    | 11,7 | 13,4 | 15,0 | 17,2 | 19,3 | 21,7 | 23,8 | 26,7   | —    | —    | —    | —    |
| 19                   | X17H25 (ЭН25)             | —               | —    | 16,3 | 17,1 | 17,4 | 18,1 | 18,8 | —    | —    | —      | —    | —    | —    | —    |
| 20                   | XH2H35 (ЭН36)             | —               | —    | 16,0 | 17,2 | 17,9 | 18,4 | 18,9 | 19,5 | 20,0 | 20,7   | —    | —    | —    | —    |
| 21                   | H28                       | 12,6            | —    | 14,7 | 16,4 | 17,6 | 18,8 | 20,5 | 22,2 | 23,5 | 25,1   | 26,4 | 27,6 | 28,4 | 29,8 |

Таблица IV-38

Средняя теплоемкость хромоникелевых аустенитных сталей  $c_{\text{ср}}$ , кДж/(кг·°C),  
в интервале температур от 50 до  $t^{\circ}\text{C}$

| Номер<br>марки<br>стали | Марка                  | Температура, °C |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------|------------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                         |                        | 100             | 150   | 200   | 250   | 300   | 350   | 400   | 450   |
| 4<br>21<br>8а           | X18H9B<br>H28<br>ЭИ69* | 0,511           | 0,519 | 0,523 | 0,528 | 0,532 | 0,536 | 0,540 | 0,544 |
|                         |                        | 0,502           | 0,507 | 0,511 | 0,519 | 0,523 | 0,528 | 0,528 | 0,532 |
|                         |                        | —               | —     | —     | —     | 0,507 | —     | 0,511 | —     |

Продолжение табл. IV-38

| Номер<br>марки<br>стали | Марка                  | Температура, °C |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------|------------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                         |                        | 500             | 550   | 600   | 650   | 700   | 750   | 800   | 850   |
| 4<br>21<br>8а           | X18H9B<br>H28<br>ЭИ69* | 0,553           | 0,561 | 0,569 | 0,574 | 0,578 | 0,582 | 0,586 | 0,590 |
|                         |                        | 0,536           | 0,540 | 0,544 | 0,548 | 0,548 | 0,553 | 0,557 | 0,557 |
|                         |                        | 0,523           | —     | 0,528 | —     | —     | —     | —     | —     |

Продолжение табл. IV-37

| Номер<br>марки<br>стали | Марка                  | Температура, °C |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------|------------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                         |                        | 900             | 950   | 1000  | 1050  | 1100  | 1150  | 1200  | 1250  | 1300  |
| 4<br>21<br>8а           | X18H9B<br>H28<br>ЭИ69* | 0,595           | 0,595 | 0,599 | 0,595 | 0,603 | 0,607 | 0,607 | 0,611 | 0,615 |
|                         |                        | 0,561           | 0,599 | 0,561 | 0,565 | 0,565 | 0,569 | 0,569 | 0,574 | 0,578 |
|                         |                        | —               | —     | —     | —     | —     | —     | —     | —     | —     |

\* Значения  $c_{\text{ср}}$  даны для интервала температур от 20 до  $t^{\circ}\text{C}$ .

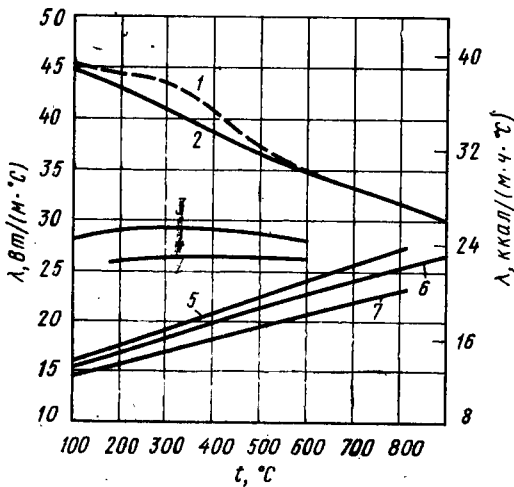
Таблица IV-39

Теплоемкость хромоникелевых сталей  $c$ , кДж/(кг·°C)

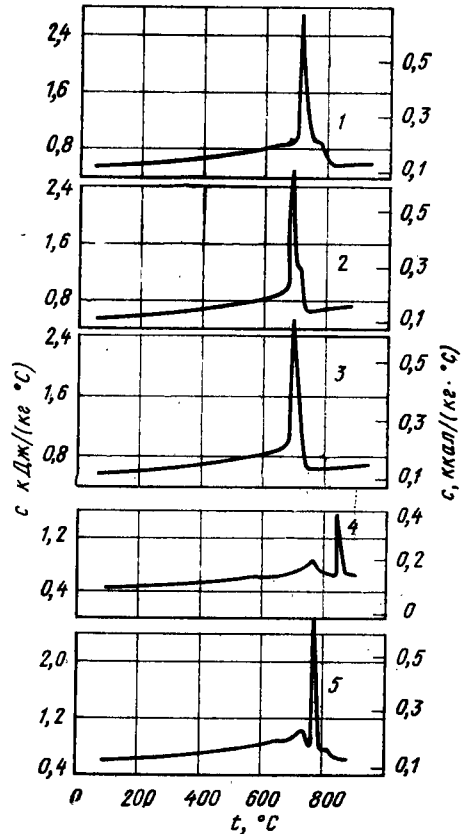
| Номер<br>марки<br>стали | Марка стали   | Интервал температур, °C |         |         |         |         |         |         |         |
|-------------------------|---------------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                         |               | 50—100                  | 100—150 | 150—200 | 200—250 | 250—300 | 300—350 | 350—400 | 400—450 |
| 4<br>21                 | X18H9B<br>H28 | 0,511                   | 0,528   | 0,532   | 0,540   | 0,548   | 0,561   | 0,569   | 0,582   |
|                         |               | 0,502                   | 0,511   | 0,519   | 0,536   | 0,544   | 0,561   | 0,540   | 0,548   |

| Номер марки стали | Марка стали   | Интервал температур, °C |                |                |                |                |                |                |                |
|-------------------|---------------|-------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                   |               | 450—500                 | 500—550        | 550—600        | 600—650        | 650—700        | 700—750        | 750—800        | 800—850        |
| 4<br>21           | X18H9B<br>H28 | 0,595<br>0,565          | 0,628<br>0,578 | 0,649<br>0,586 | 0,632<br>0,590 | 0,624<br>0,586 | 0,628<br>0,586 | 0,641<br>0,586 | 0,649<br>0,586 |

| Номер<br>марки<br>стали | Марка стали   | Интервал температур, °C |                |                |                |                |                |                |                |                |
|-------------------------|---------------|-------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                         |               | 850—<br>900             | 900—<br>950    | 950—<br>1000   | 1000—<br>1050  | 1050—<br>1100  | 1100—<br>1150  | 1150—<br>1200  | 1200—<br>1250  | 1250—<br>1300  |
| 4<br>21                 | X18H9B<br>H28 | 0,641<br>0,590          | 0,649<br>0,595 | 0,649<br>0,599 | 0,653<br>0,599 | 0,662<br>0,603 | 0,666<br>0,611 | 0,674<br>0,624 | 0,678<br>0,641 | 0,682<br>0,662 |

Рис. 27. Зависимость коэффициента теплопроводности  $\lambda$  легированных сталей от температуры  $t$ :

1 — 15ХФ; 2 — 12МХ; 3 — 4Х13; 4 — 2Х13; 5 — ЭЯ1Т; 6 — ЭИ257; 7 — Г21Х15

Рис. 28. Зависимость истинной теплоемкости  $c$  легированных сталей от температуры:

1 — сталь 30Г2; 2 — 25Н3; 3 — 30ХН3; 4 — Р18; 5 — 50С2Г

| Марка стали |                    | Температура, °C |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |  |
|-------------|--------------------|-----------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| 0           | 20                 | 100             | 200  | 300   | 400   | 500   | 600   | 700   | 800   | 900   | 1000  | 1100  | 1200  | 1300  |       |  |
| 16          | X18H9              | —               | 74,3 | 81,9  | 89,1  | 95,1  | 100,1 | 104,8 | 109,4 | 114,0 | —     | —     | —     | —     | —     |  |
| 2           | 2X18H9 (ЭЯ2)       | —               | 72,0 | 73,5  | 85,5  | 92,5  | 97,5  | 103,0 | 108,0 | 111,5 | 118,5 | —     | —     | —     | —     |  |
| 3           | 1X18H9T (ЭЯ1T)     | —               | 72,3 | 79,2  | 85,1  | 91,2  | 97,1  | 101,5 | 106,5 | 109,2 | 113,0 | —     | —     | —     | —     |  |
| 3a          | 1X18H9T (ЭЯ1T)     | —               | 75   | 80,5  | 87,5  | 94,0  | 99,5  | 105,0 | 109,5 | 114,0 | —     | —     | —     | —     | —     |  |
| 4           | X18H9B             | 69,4            | 71,0 | 77,6  | 85,0  | 91,6  | 97,6  | 102,6 | 107,2 | 111,1 | 114,1 | 117,1 | 119,5 | 122,0 | 124,1 |  |
| 7a          | X18H11B            | —               | —    | 84,6  | 91,6  | 97,6  | 103,4 | 107,8 | 111,6 | 115,0 | 117,8 | —     | —     | —     | —     |  |
| 8           | 4X14H14B2M (ЭЯ257) | —               | 81,5 | 87,5  | 94,5  | 100   | 105,5 | 110   | 114   | 117,5 | —     | —     | —     | —     | —     |  |
| 9           | 1X14H14B2M (ЭЯ257) | —               | —    | 82,4  | 88,9  | 95,6  | 100,2 | 104,5 | 108,5 | 112,0 | 115,5 | 119,2 | —     | —     | —     |  |
| 9a          | 1X14H14B2M (ЭЯ257) | —               | 83,1 | 85,8  | 94,3  | 100,5 | 105,6 | 109,8 | 114,2 | 117,5 | 120,5 | 123,5 | —     | —     | —     |  |
| 10          | 1X14H18M3T         | —               | —    | 89    | 95    | 100   | 104   | 107,5 | 111   | 115   | 124   | —     | —     | —     | —     |  |
| 15a         | X18H26C2 (ЭЯ25C)   | —               | —    | 98,5  | 103   | 105,5 | 107,5 | 110   | 114   | 117,5 | —     | —     | —     | —     | —     |  |
| 18          | X13H25M2B2         | —               | —    | 103,0 | 108,0 | 112,1 | 115,3 | 118,1 | 119   | 121   | 123   | —     | —     | —     | —     |  |
| 19          | X7H25 (ЭЯ25)       | —               | —    | —     | —     | 109   | 112   | 115   | 118   | 121   | 124   | 127   | —     | —     | —     |  |
| 20          | X2H35 (ЭЯ36)       | —               | 87,5 | 92,5  | 98,5  | 103   | 107   | 110   | 113,5 | 116   | 118,5 | 120,5 | —     | —     | —     |  |
| 21          | H28                | 82,9            | 84,2 | 89,1  | 94,7  | 99,6  | 103,9 | 107,7 | 111,2 | 114,2 | 116,5 | 118,4 | 120,6 | 122,5 | 124,3 |  |

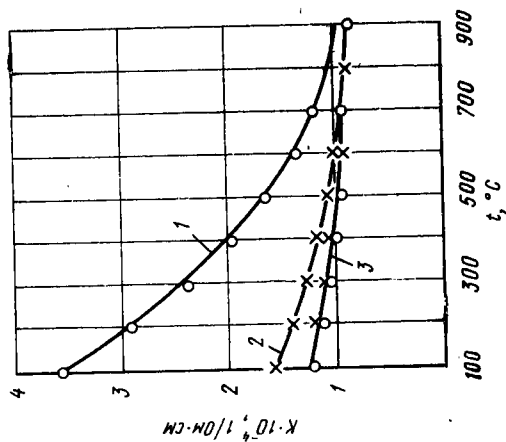


Рис. 29. Зависимость удельной электропроводности  $k$  легированных сталей от температуры  $t$ :  
 1 — 12МХ; О — 15ХФ; 2 — 2Х13 и Х — 4Х13;  
 3 — ЭЯ1Т; О — ЭЯ257; ХГ21Х15

Таблица IV-41

Средний коэффициент линейного расширения хромоникелевых аустенитных сталей  $\beta_{10^6}$ ,  $1^\circ\text{C}$  в интервалах температур от 20 до  $t^\circ$ ,  $^\circ\text{C}$ 

| Номер марки стали | Марка стали           | Температура, °С |           |           |           |           |              |              |              |              |              |      |      |
|-------------------|-----------------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------|------|
|                   |                       | 100             | 200       | 300       | 400       | 500       | 600          | 700          | 800          | 900          | 1000         | 1100 | 1200 |
| 1                 | X18H9 (ЭЯ1)           | 16              | 16        | 17,5      | 18,1      | —         | —            | —            | —            | —            | —            | —    | —    |
| 1а                | X18H9 (ЭЯ1)           | 17,3            | 17,5      | 17,8      | 18,0      | 18,3      | 18,5         | 18,8         | —            | —            | —            | —    | —    |
| 1б                | X18H9                 | 17,3            | 17,5      | 17,8      | 18,0      | 18,3      | 18,5         | 18,8         | 19,4         | —            | —            | —    | —    |
| 3                 | IX18H9T (ЭЯ1T)        | 15,1            | 17,0      | 17,8      | 18,3      | 18,5      | 18,8         | 19,1         | 18,5         | 19,3         | —            | —    | —    |
| 3а                | IX18H9T (ЭЯ1T)        | 16,6            | 17,0      | 17,2      | 17,5      | 17,9      | 18,2         | 18,6         | 18,5         | —            | —            | —    | —    |
| 3в                | IX18H9T (ЭЯ1T)        | 16,7            | 16,9      | 17,1      | 17,7      | 18,3      | 18,9         | 19,6         | 20,2         | —            | —            | —    | —    |
| 4                 | X19H8B                | 14,8            | 16,5      | 17,1      | 17,6      | 18,0      | 18,4         | 18,8         | 19,0         | 19,2         | 19,4         | 19,5 | 19,6 |
| 5                 | X18H9M                | 17,3            | 17,5      | 17,8      | 18,0      | 18,3      | 18,5         | 18,8         | —            | —            | —            | —    | —    |
| 6                 | X18H9C2               | 16,2            | 17,1      | 17,9      | 18,6      | 19,2      | 19,9         | 20,5         | —            | —            | —            | —    | —    |
| 7                 | X18H11Б               | 16,7            | 16,9      | 17,1      | 17,7      | 18,3      | 18,8         | 19,3         | 19,9         | —            | —            | —    | —    |
| 9                 | IX14H14B2M            | —               | —         | —         | —         | —         | —            | —            | —            | —            | —            | —    | —    |
| 9а                | (ЭИ257)<br>IX14H14B2M | 16,1            | 17,3      | 17,8      | 18,1      | 18,4      | 18,8         | 19,1         | 19,3         | 19,5         | —            | —    | —    |
| 11                | (ЭИ257)               | 17,0            | 17,8      | 18,3      | 18,8      | 19,0      | 19,2         | 19,4         | 19,9         | 20,5         | —            | —    | —    |
| 12                | X18H12                | 17,3            | 17,5      | 17,8      | 18,0      | 18,3      | 18,5         | 18,8         | —            | —            | —            | —    | —    |
| 13                | X20H11                | 17,3            | 17,5      | 17,8      | 18,0      | 18,3      | 18,5         | 18,8         | —            | —            | —            | —    | —    |
| 13                | X23H13 (ЭИ319)        | 15,0            | —         | —         | —         | —         | 17,5         | —            | 19,2         | —            | —            | —    | —    |
| 13а               | X23H13 (ЭИ319)        | 14,9            | —         | 16,6      | 17,1      | 17,5      | 17,8         | 18,2         | —            | —            | —            | —    | —    |
| 14                | 2X25H20               | 14,4            | 15,2      | 16,1      | 16,5      | 16,8      | 17,2         | 17,6         | —            | —            | 19,1         | —    | —    |
| 15                | X18H25C2 (ЭЯ3С)       | 16,2            | —         | —         | —         | —         | 19,3         | —            | —            | —            | —            | —    | —    |
| 16                | X20H14C2              | —               | —         | —         | —         | —         | —            | —            | —            | —            | —            | —    | —    |
| 17                | (ЭИ211)<br>X25H20C2   | 16,0            | —         | —         | —         | —         | 18,1         | 18,3         | 18,5         | 18,8         | 19,0         | —    | —    |
| 21                | (ЭИ283)<br>H28        | 16,1<br>13,7    | —<br>15,3 | —<br>16,3 | —<br>17,0 | —<br>17,5 | 17,8<br>17,8 | 17,8<br>18,1 | 18,1<br>18,3 | 18,5<br>18,6 | 18,8<br>18,8 | 19,1 | 19,4 |

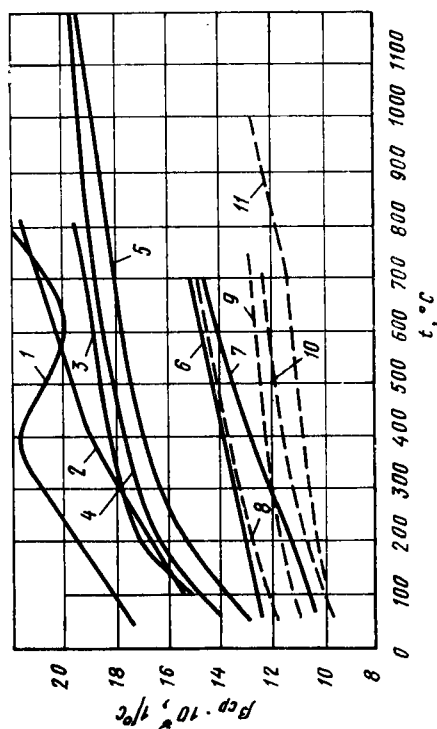


Рис. 30. Зависимость средних коэффициентов линейного расширения  $\beta_{cp}$  сталей от температуры  $t$ :  
 1 — П13; 2 — Г21Х15Т; 3 — Х18Н9Т; 4 — Х18Н8В; 5 — Н28; 6 — углеродистая с 0,6% С; 7 — то же, 1,2% С; 8 — 30ХН3; 9 — Р18; 10 — 3Х13; 11 — Х28

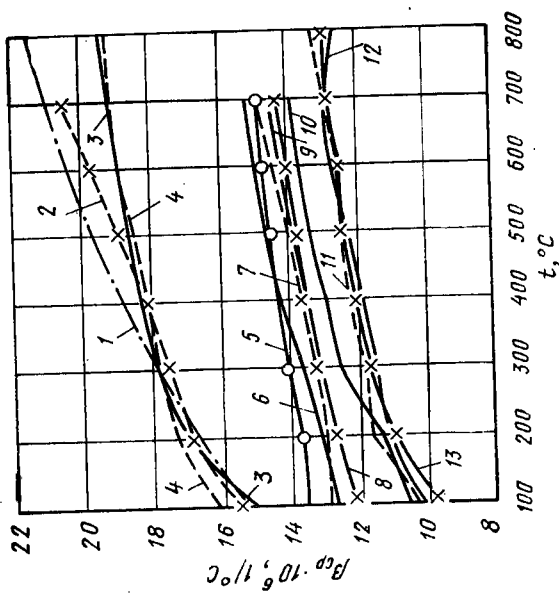


Рис. 31. Значения средних коэффициентов линейного расширения легированных сталей  $\beta_{cp}$  в интервале температур от 20 до  $t^{\circ}C$ :  
 1 — Г21Х15Т; 2 — Г20Х12; 3 — Э91Т; 4 — ЭИ257; 5 — 10Х2М; 6 — 12МХ; 7 — 15ХФ; 8 — 10Х2Ф; 9 — 10Х2ФГ; 10 — 10Х2ФВ; 11 — Х13; 12 — 2Х13; 13 — 4Х13

## 5. Высоколегированные стали

Таблица IV-42

Химический состав высоколегированных сталей с особыми свойствами\*

| Номер марки | Марка стали | Содержание, % |       |      |           |       |      |      |         |         |      | Режим термической обработки | Характеристики, приведенные в последующих таблицах | Температурный интервал исследования, °С |
|-------------|-------------|---------------|-------|------|-----------|-------|------|------|---------|---------|------|-----------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------|
|             |             | C             | Mn    | Si   | Cr        | Mo    | Ni   | Ti   | V       | W       | Co   | Nb                          |                                                    |                                         |
| 1           | Г13         | 1,22          | 13,0  | 0,22 | —         | —     | —    | —    | —       | —       | —    | —                           | Нагрев до 1050 °С, охлаждение на воздухе           | 0—1200                                  |
| 2           | Г20Х12Ф*    | 0,26          | 18,0  | 0,83 | 12,05     | —     | —    | —    | 0,51    | —       | —    | —                           | Стабилизация при 800 °С 10 ч                       | 20—900                                  |
| 3           | Г21Х15Т*    | 0,05          | 20,88 | 0,66 | 14,66     | —     | —    | 0,25 | —       | —       | —    | —                           | То же                                              | 20—900                                  |
| 4           | Х13Н13К10*  | 0,4           | 0,8   | 1,0  | 13,0      | 2,0   | 13,0 | —    | —       | 2,5     | 10   | 3,0                         | —                                                  | 20—800                                  |
| 5           | Х19Н10К47*  | 0,27          | 0,77  | 0,52 | 19,1      | 2,2   | 10,5 | —    | 3,0     | —       | 46,6 | 1,0                         | —                                                  | 20—800                                  |
| 6           | Р18         | 0,715         | 0,25  | 0,30 | 4,26      | Следы | 0,07 | —    | 1,1     | 18,45   | —    | —                           | Отжиг, 830 °С                                      | 20—1200                                 |
| 7           | ЭР          | 0,66—0,28     | 0,40  | 0,40 | 3,8—4,6   | —     | 0,20 | —    | 0,5—0,8 | 17—18,5 | —    | —                           | Исходное состояние                                 | 20—900                                  |
| 7а          | ЭР          | 0,66—0,28     | 0,40  | 0,40 | 3,8—4,6   | —     | 0,20 | —    | 0,5—0,8 | 17—18,5 | —    | —                           | Нормализация                                       | 20—900                                  |
| 8           | ЭХ12        | 2—2,3         | 0,35  | 0,5  | 11,5—13,0 | —     | —    | —    | —       | 0,5—1,0 | —    | —                           | —                                                  | 20—900                                  |
| 9           | ЭИ107       | 0,40          | 0,50  | 2,33 | 10,5      | 0,70  | 0,36 | —    | —       | —       | —    | —                           | —                                                  | 20—700                                  |
| 9а          | ЭИ107       | 0,40          | 0,38  | 2,4  | 10,8      | 0,82  | —    | —    | —       | —       | —    | —                           | —                                                  | 20—600                                  |

\* Марка стали обозначена не по ГОСТу, а по химическому составу.

Таблица IV-43

Коэффициент теплопроводности высоколегированных сталей с особыми свойствами  $\lambda$ , Вт/(м·°C)

| Номер марки стали | Марка стали | Температура, °C |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------|-------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                   |             | 0               | 20   | 100  | 200  | 300  | 400  | 500  | 600  | 700  | 800  |
| 1                 | Г13         | 11,9            | —    | 14,7 | 16,3 | 18,0 | 19,3 | 20,5 | 21,8 | 22,6 | 23,5 |
| 2                 | Г20Х12Ф     | —               | 13,7 | 14,7 | 15,9 | 17,2 | 18,4 | 19,7 | 20,9 | 22,1 | 23,3 |
| 3                 | Х21Х15Т     | —               | 13,7 | 14,7 | 15,9 | 17,2 | 18,4 | 19,7 | 20,9 | 22,1 | 23,3 |
| 4                 | Х13Н13К10   | —               | —    | 13,4 | 15,1 | 17,2 | 18,8 | 20,5 | 22,2 | 23,8 | 25,7 |
| 5                 | Х19Н10К47   | —               | —    | 14,7 | 16,3 | 18,0 | 19,7 | 21,4 | 23,0 | 24,3 | 25,9 |
| 6                 | Р18         | 24,3            | —    | 25,9 | 27,2 | 28,0 | 28,5 | 28,0 | 27,2 | 26,7 | 25,9 |
| 7                 | ЭР          | —               | 25,7 | 27,3 | 29,1 | 29,1 | 29,1 | 28,8 | 28,5 | 28,3 | 27,8 |
| 7а                | ЭР          | —               | 24,4 | 26,2 | 27,1 | 27,9 | 28,3 | 28,3 | 28,3 | 28,0 | 26,9 |
| 8                 | ЭХ12        | —               | 33,0 | 36,1 | 36,4 | 34,3 | 32,6 | 30,8 | 29,3 | 28,0 | 26,9 |
| 9                 | ЭН107       | 16,7            | —    | 18,4 | 19,9 | 21,7 | 22,4 | 23,6 | 24,7 | 25,5 | —    |

Таблица IV-44

Средняя теплоемкость  $c$ , кДж/(кг·°C), высоколегированных сталей с особыми свойствами в интервале температур 50 —  $t$ , °C

| Номер марки стали | Марка  | Температура, °C |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------|--------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                   |        | 100             | 150   | 200   | 250   | 300   | 350   | 400   | 450   | 500   | 550   | 600   | 700   |
| 1                 | Г13    | 0,519           | 0,528 | 0,540 | 0,553 | 0,561 | 0,569 | 0,574 | 0,578 | 0,582 | 0,595 | 0,603 | 0,611 |
| 6                 | Р18    | 0,410           | 0,410 | 0,423 | 0,431 | 0,439 | 0,448 | 0,456 | 0,465 | 0,473 | 0,486 | 0,494 | 0,502 |
| 9а                | ЭН107* | —               | —     | —     | —     | —     | —     | 0,532 | 0,561 | 0,561 | —     | 0,586 | —     |

Продолжение табл. IV-44

| Номер марки стали | Марка  | Температура, °C |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------|--------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                   |        | 750             | 800   | 850   | 900   | 950   | 1000  | 1050  | 1100  | 1150  | 1200  | 1250  | 1300  |
| 1                 | Г13    | 0,611           | 0,615 | 0,619 | 0,619 | 0,624 | 0,624 | 0,628 | 0,632 | 0,652 | 0,636 | 0,641 | 0,641 |
| 6                 | Р18    | 0,528           | 0,540 | 0,548 | 0,561 | 0,561 | 0,565 | 0,565 | 0,569 | 0,569 | 0,574 | 0,574 | 0,574 |
| 9а                | ЭН107* | —               | —     | —     | —     | —     | —     | —     | —     | —     | —     | —     | —     |

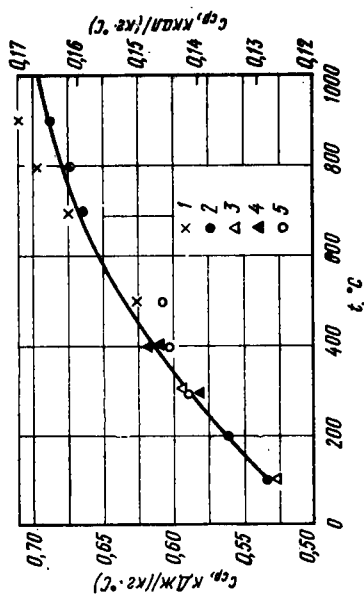
\* Значения  $c_{cp}$  даны в интервале температур от 20 до  $t$  °C

Рис. 32. Зависимость теплоемкости марганцевых сплавов с различным содержанием марганца от температуры. Содержание Mn, %:

1 — 40; 2 — 20; 3 — 17; 4 — 14,7; 5 — 11

Таблица IV-45

Теплоемкость  $c$ , кДж/(кг·°С), высоколегированных сталей с особыми свойствами при различной температуре

| Температурный интервал, °С | Г13   |       | Температурный интервал, °С | Г13   |       | Температурный интервал, °С | Г13   |       |
|----------------------------|-------|-------|----------------------------|-------|-------|----------------------------|-------|-------|
|                            | Г13   | P18   |                            | Г13   | P18   |                            | Г13   | P18   |
| 50—100                     | 0,519 | 0,410 | 500—550                    | 0,695 | 0,582 | 900—950                    | 0,666 | 0,582 |
| 100—150                    | 0,540 | 0,427 | 550—600                    | 0,703 | 0,599 | 950—1000                   | 0,674 | 0,595 |
| 150—200                    | 0,565 | 0,435 | 600—650                    | 0,641 | 0,615 | 1000—1050                  | 0,682 | 0,607 |
| 200—250                    | 0,565 | 0,452 | 650—700                    | 0,641 | 0,636 | 1050—1100                  | 0,687 | 0,615 |
| 250—300                    | 0,599 | 0,465 | 700—750                    | 0,649 | 0,716 | 1100—1150                  | 0,695 | 0,611 |
| 300—350                    | 0,607 | 0,487 | 750—800                    | 0,649 | 0,716 | 1150—1200                  | 0,695 | 0,611 |
| 350—400                    | 0,607 | 0,502 | 800—850                    | 0,657 | 0,682 | 1200—1250                  | 0,703 | 0,611 |
| 400—450                    | 0,615 | 0,523 | 850—900                    | 0,666 | 0,737 | 1250—1300                  | 0,708 | 0,611 |
| 450—500                    | 0,615 | 0,553 |                            |       |       |                            |       |       |

Таблица IV-46

Плотность  $\rho$ , г/см<sup>3</sup>, высоколегированных сталей с особыми свойствами

| Номер марки стали | Марка стали | Температура, °С |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------|-------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                   |             | 0               | 100   | 200   | 300   | 400   | 500   | 600   | 700   | 800   | 900   | 1000  | 1100  |
| 1                 | Г13         | 7,877           | 7,834 | 7,785 | 7,730 | 7,672 | 7,632 | 7,595 | 7,538 | 7,464 | 7,378 | 7,330 | 7,263 |
| 2                 | Г20Х12Ф     | 7,66            | 7,62  | 7,58  | 7,54  | 7,47  | 7,42  | 7,35  | 7,28  | —     | —     | —     | —     |
| 3                 | Г21Х15Т     | 7,66            | 7,63  | 7,58  | 7,53  | 7,46  | 7,41  | 7,36  | 7,29  | 7,22  | —     | —     | —     |
| 6                 | P18         | 8,696           | 8,667 | 8,635 | 8,602 | 8,569 | 8,534 | 8,498 | 8,462 | 8,425 | 8,430 | 8,372 | 8,313 |

Таблица IV-47

Коэффициент температуропроводности  $a$ , м<sup>2</sup>/ч, высоколегированных сталей с особыми свойствами

| Температурный интервал, °С | Марка стали |        | Температурный интервал, °С | Марка стали |        | Температурный интервал, °С | Марка стали |        |
|----------------------------|-------------|--------|----------------------------|-------------|--------|----------------------------|-------------|--------|
|                            | Г13         | P18    |                            | Г13         | P18    |                            | Г13         | P18    |
| 50—100                     | 0,0126      | 0,0259 | 400—450                    | 0,0148      | 0,0240 | 750—800                    | 0,0173      | 0,0155 |
| 100—150                    | 0,0130      | 0,0256 | 450—500                    | 0,0155      | 0,0216 | 800—850                    | 0,0173      | 0,0162 |
| 150—200                    | 0,0130      | 0,0259 | 500—550                    | 0,0144      | 0,0202 | 850—900                    | 0,0177      | 0,0155 |
| 200—250                    | 0,0134      | 0,0252 | 550—600                    | 0,0144      | 0,0195 | 900—950                    | 0,0180      | 0,0198 |
| 250—300                    | 0,0137      | 0,0252 | 600—650                    | 0,0162      | 0,0188 | 950—1000                   | 0,0184      | 0,0198 |
| 300—350                    | 0,0140      | 0,0245 | 650—700                    | 0,0166      | 0,0180 | 1000—1050                  | 0,0187      | 0,0198 |
| 350—400                    | 0,0148      | 0,0238 | 700—750                    | 0,0169      | 0,0159 | 1050—1100                  | 0,0181      | 0,0198 |

Таблица IV-48

Удельное электросопротивление  $\rho_a$   $10^6$ , Ом·см, высоколегированных сталей с особыми свойствами

| Номер<br>марки<br>стали | Марка стали | Температура, °С |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------|-------------|-----------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                         |             | 0               | 20   | 100  | 200  | 300   | 400   | 500   | 600   | 700   | 800   | 900   | 1000  | 1100  | 1200  | 1300  |
|                         |             |                 |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 1                       | Г13         | 66,5            | 68,3 | 75,6 | 84,7 | 93,1  | 99,4  | 95,2  | 103,8 | 114,7 | 120,0 | 123,8 | 125,3 | 127,0 | 128,8 | 130,8 |
| 2                       | Г20Х12Ф     | —               | 72,3 | 79,2 | 85,1 | 91,2  | 97,1  | 101,5 | 106,5 | 109,2 | 113,0 | —     | —     | —     | —     | —     |
| 3                       | Г21Х15Т     | —               | —    | 82,4 | 88,9 | 95,6  | 100,2 | 104,5 | 108,5 | 112,5 | 115,5 | 119,2 | —     | —     | —     | —     |
| 4                       | Х13Н13К10   | —               | —    | 90,0 | 95,6 | 100,8 | 105,6 | 109,6 | 112,8 | 115,4 | 117,5 | 119,6 | —     | —     | —     | —     |
| 5                       | Х19Н10К47   | —               | —    | 90,5 | 94,6 | 98,6  | 102,1 | 105,2 | 108,1 | 110,8 | 113,4 | —     | —     | —     | —     | —     |
| 6                       | Р18         | 40,6            | 41,9 | 47,2 | 54,4 | 62,7  | 71,8  | 81,5  | 92,2  | 103,7 | 115,2 | 117,3 | 120,9 | 123,6 | 126,6 | 128,1 |
| 7                       | ЭР          | —               | 42   | 48   | 55   | —     | —     | 93,5  | 98    | 102   | 108   | 116   | —     | —     | —     | —     |
| 7а                      | ЭР          | —               | 50   | 62,5 | 69,5 | 77    | 84    | 91,5  | 98,5  | 106   | 113   | 120   | —     | —     | —     | —     |
| 8                       | ЭХ12        | —               | 31   | 36   | 43   | 53    | 64    | 75    | 86    | 97    | 108   | 119   | —     | —     | —     | —     |
| 9                       | ЭИ107       | —               | 86   | 91   | 96   | 101   | 106,5 | 112   | 117   | 122   | —     | —     | —     | —     | —     | —     |

Таблица IV-49

Средний коэффициент линейного расширения  $\beta$   $10^6$ ,  $1/^\circ\text{C}$ , высоколегированных сталей с особыми свойствами в интервале температур от 20 до  $t$ ,  $^\circ\text{C}$ 

| Номер марки стали | Марка стали | Температура, °C |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------|-------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                   |             | 50              | 100   | 200   | 300   | 400   | 500   | 600   | 700   | 800   | 900   | 1000  | 1100  | 1200  |
| 1                 | Г13         | 17,34           | 18,01 | 19,37 | 20,71 | 21,71 | 20,76 | 19,96 | 20,49 | 21,86 | 23,45 | 23,13 | 23,61 | 25,60 |
| 2                 | Г20Х12Ф     | —               | 15,4  | 17,6  | 18,9  | 21,20 | 21,6  | 23,1  | 25,0  | —     | —     | —     | —     | —     |
| 3                 | Г21Х15Т     | —               | 15,3  | 17,6  | 19,8  | 21,80 | 22,7  | 23,0  | 24,1  | 25,2  | —     | —     | —     | —     |
| 6                 | Р18         | 10,98           | 11,23 | 11,71 | 11,98 | 12,20 | 12,41 | 12,62 | 12,79 | 12,97 | 11,35 | 12,44 | 13,34 | 14,09 |

Таблица IV-50

Теплофизические свойства жаростойких и жаропрочных сталей<sup>\*1</sup>

| Марка стали        | Химический состав, % |         |         |           |           | Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | Удельное электросопротивление $\rho_{\Sigma}$ , Ом·мм <sup>2</sup> /м                                          | Коэффициент линейного расширения $\beta$ 10 <sup>-6</sup> , 1/°C | Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·°C)                                                     | Теплоемкость истинная $c$ , кДж/(кг·°C) |
|--------------------|----------------------|---------|---------|-----------|-----------|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
|                    | C                    | Si      | Mn      | Cr        | Ni        |                                      |                                                                                                                |                                                                  |                                                                                                        |                                         |
| Хромистые          |                      |         |         |           |           |                                      |                                                                                                                |                                                                  |                                                                                                        |                                         |
| X18                | 0,9—1,0              | <0,8    | <0,7    | 17,0—19,0 | <0,6      | 7,6                                  | 0,65—0,67 (20)                                                                                                 | 10,5 (200—100)                                                   | 23,3 (20)                                                                                              | 0,503 (20)                              |
| X25                | <0,2                 | <1,0    | <0,8    | 23,0—27,0 | <0,6      | 7,6                                  | 0,68 (0); 0,88 (200)                                                                                           | —                                                                | —                                                                                                      | —                                       |
| Высокохромистые    |                      |         |         |           |           |                                      |                                                                                                                |                                                                  |                                                                                                        |                                         |
| X251*2 (ЭИ439)     | <0,15                | <1,0    | <0,8    | 23,0—27,0 | <0,6      | 7,6                                  | 1,02 (400); 1,13 (600)                                                                                         | 10,0—10,7 (20—100)                                               | 20,9 (20)                                                                                              | 0,503 (20)                              |
| X28 (ЭИ27; ЭИ349)  | <0,15                | <1,0    | <0,8    | 27,0—30,0 | <0,6      | 7,6                                  | 1,22 (800); 1,27 (1000)                                                                                        | —                                                                | —                                                                                                      | —                                       |
| Спильхромовые      |                      |         |         |           |           |                                      |                                                                                                                |                                                                  |                                                                                                        |                                         |
| X9C2 (ЭСХ8)        | 0,35—0,5             | 2,0—3,0 | <0,7    | 8,0—10,0  | <0,6      | 7,6                                  | 0,75 (20)                                                                                                      | 10,7 (20—100)                                                    | 20,9 (20)                                                                                              | 0,46 (20)                               |
| X25C3H; (ЭИ261)    | <0,35                | 2,5—3,5 | <0,7    | 23,0—27,0 | 0,7—1,30  | 7,6                                  | 0,8 (20)                                                                                                       | 10,0 (20—100)                                                    | 20,9 (20)                                                                                              | 0,46 (20)                               |
| Высоколегированные |                      |         |         |           |           |                                      |                                                                                                                |                                                                  |                                                                                                        |                                         |
| X23H18 (ЭИ417)     | <0,2                 | <1,0    | <2,0    | 22,0—20,0 | 17,0—20,0 | 7,8                                  | 0,85—1,00 (100)<br>0,90—1,05 (200)<br>1,00—1,10 (400)<br>1,12—1,17 (600)<br>1,19—1,23 (800)<br>1,21—1,26 (900) | 15,0—16,2 (20—100)<br>—<br>—<br>—<br>—<br>—                      | 13,2—17,4 (100)<br>14,2—19,1 (200)<br>16,6—19,7 (400)<br>22—29 (600)<br>25—31,4 (600)<br>26,7—29 (900) | 0,503 (20)<br>—<br>—<br>—<br>—<br>—     |
| X20H35             | 0,15                 | 1,0—2,0 | 0,5—1,0 | 15—20     | 30—35     | 7,95                                 | 1,06 (0)<br>1,13 (200)<br>1,20 (400)<br>1,24 (600)<br>1,28 (800)<br>1,32 (1000)                                | 16,0—(20—100)<br>—<br>—<br>—<br>—<br>—                           | 12,8—15,1 (20)<br>—<br>—<br>—<br>—<br>—                                                                | 0,503 (20)<br>—<br>—<br>—<br>—<br>—     |

Примечание. В скобках приведена температура, °C.

<sup>\*1</sup> Марки обозначены не по ГОСТу, а по химическому составу стали.<sup>\*2</sup> Сталь X251(ЭИ439) содержит 0,6—0,8% Ti.

## 6. Стали для отливок

Таблица IV-51

## Теплофизические свойства сталей для отливок

[illegible]

\*! Значения приведены для интервала температур от 25°C. \*<sup>2</sup> Для интервала 25—630°C. \*<sup>3</sup> При 20°C. \*<sup>4</sup> Для конечной температуры интервала.

## 7. Чугуны

Таблица IV-52

## Химический состав литейных чугунов по ГОСТ 4832—58

[illegible]

Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  чугунов

| Чугун                    | Состав, % |      |      |       |      |      |      |      |       |  | Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·°С), при температуре, °С |      |      |      |      |
|--------------------------|-----------|------|------|-------|------|------|------|------|-------|--|-------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|
|                          | C         | Si   | Mn   | Ni    | Cr   | Mo   | Cu   | Al   | S + P |  | 0                                                                       | 100  | 200  | 300  | 400  |
| Обыкновенный . . . . .   | 2,61      | 2,46 | 0,45 | —     | —    | —    | —    | —    | —     |  | 48,5                                                                    | 46,1 | 44,1 | 42,8 | 41,9 |
|                          | 3,11      | 2,26 | 0,39 | —     | —    | —    | —    | —    | —     |  | 49,0                                                                    | 46,5 | 44,5 | 43,2 | 42,4 |
|                          | 3,20      | 1,56 | 0,72 | —     | —    | —    | —    | —    | —     |  | 53,2                                                                    | 50,6 | 48,6 | 46,5 | 45,1 |
| Молибденохромистый . .   | 3,12      | 2,31 | 0,39 | —     | 0,54 | 0,77 | —    | —    | —     |  | 50,3                                                                    | 49,7 | 47,7 | 46,5 | 45,6 |
| Молибденовый . . . . .   | 2,56      | 2,20 | 0,63 | —     | —    | 0,58 | —    | —    | —     |  | 50,5                                                                    | 49,4 | 47,7 | 46,5 | 45,4 |
| Хромоникелевый . . . . . | 2,8       | 2,51 | 0,68 | 4,71  | 0,54 | —    | —    | —    | —     |  | 44,0                                                                    | 42,3 | 41,3 | 40,5 | 39,0 |
|                          | 3,41      | 1,03 | 0,65 | 1,49  | 0,54 | —    | —    | —    | —     |  | 49,2                                                                    | 48,6 | 47,0 | 45,8 | 44,3 |
| Марганцевоникелевый . .  | 3,10      | 2,51 | 3,11 | 1,00  | —    | —    | —    | —    | —     |  | 42,9                                                                    | 42,0 | 41,4 | 40,7 | 40,6 |
| Никельрезист . . . . .   | 2,41      | 1,80 | 0,62 | 13,7  | 3,37 | —    | 6,41 | —    | —     |  | 35,9                                                                    | 33,8 | 32,4 | 31,5 | 31,3 |
| Никросилал . . . . .     | 1,91      | 6,42 | —    | 18,65 | 2,02 | —    | —    | —    | —     |  | 30,4                                                                    | 29,3 | 27,9 | 26,7 | 26,3 |
| Хромоалюминиевый . . .   | 2,7       | 0,96 | 0,58 | —     | 0,95 | —    | —    | 7,30 | —     |  | 34,4                                                                    | 33,0 | 32,4 | 31,4 | 30,1 |
| Медистый . . . . .       | 3,18      | 1,58 | 0,69 | —     | —    | —    | 1,58 | —    | —     |  | 48,7                                                                    | 47,1 | 44,4 | 43,8 | 41,1 |
|                          | 3,18      | 1,59 | —    | —     | —    | —    | 0,99 | —    | —     |  | 45,8                                                                    | 44,4 | 43,1 | 41,9 | 41,0 |
|                          | 3,18      | 1,49 | —    | —     | —    | —    | 1,98 | —    | —     |  | 48,1                                                                    | 46,0 | 43,5 | 41,4 | 38,8 |
|                          | 2,20      | 1,50 | —    | —     | —    | —    | 0,53 | —    | —     |  | 44,5                                                                    | 43,1 | 41,8 | 41,0 | 39,6 |
|                          | 3,16      | 1,44 | —    | —     | —    | —    | 3,10 | —    | —     |  | 47,6                                                                    | 46,0 | 44,0 | 42,6 | 41,1 |
|                          | 3,15      | 1,58 | —    | —     | —    | —    | 1,43 | —    | —     |  | 45,7                                                                    | 44,4 | 43,1 | 41,4 | 40,2 |

| Чугун                              | Состав, % |      |      |    |      |    |      |    |       | Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·°C), при температуре, °C |       |      |      |      |
|------------------------------------|-----------|------|------|----|------|----|------|----|-------|-------------------------------------------------------------------------|-------|------|------|------|
|                                    | C         | Si   | Mn   | Ni | Cr   | Mo | Cu   | Al | S + P | 0                                                                       | 100   | 200  | 300  | 400  |
| Обыкновенный чистый                | 3,16      | 1,54 | —    | —  | —    | —  | —    | —  | —     | 47,6                                                                    | 45,9  | 44,1 | 43,1 | 41,6 |
|                                    | 3,00      | —    | —    | —  | —    | —  | —    | —  | —     | 58,7                                                                    | —     | —    | —    | 46,3 |
| Серый чугун . . . . .              | 3,08      | 1,24 | 0,94 | —  | 0,08 | —  | 0,36 | —  | +     | 54,5                                                                    | 53,0  | 51,0 | 48,6 | 45,8 |
|                                    | 3,25      | 1,91 | 0,97 | —  | 0,07 | —  | 0,81 | —  | +     | 49,7                                                                    | 46,5  | 46,4 | 43,9 | 41,9 |
|                                    | 3,32      | 1,52 | 2,43 | —  | 0,01 | —  | 0,71 | —  | +     | 51,3                                                                    | 49,0  | 47,0 | 44,4 | 42,3 |
|                                    | 3,19      | 1,42 | 0,96 | —  | 0,20 | —  | —    | —  | —     | 55,0                                                                    | 53,2  | 51,0 | 48,6 | 42,4 |
| Отожженный ковкий чугуны . . . . . | 2,8       | 0,39 | 0,1  | —  | 0,09 | —  | 0,06 | —  | +     | —                                                                       | 47,6  | 42,7 | 45,3 | 45,4 |
|                                    | —         | —    | —    | —  | —    | —  | —    | —  | +     | —                                                                       | 16,7* | —    | —    | —    |

Примечание. Плюс обозначено наличие S+P, минусом — отсутствие.

\* При 1400°C.

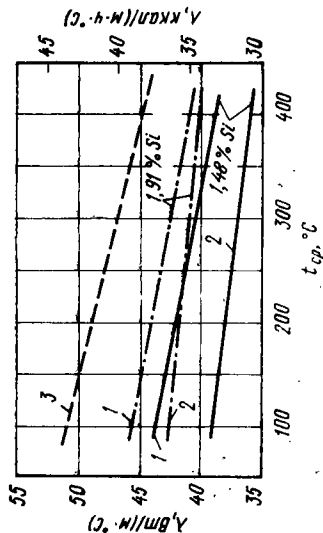


Рис. 33. Зависимость коэффициента теплопроводности чугуна наложения от температуры  $t$ :  
1 — до службы; 2 — после нее; 3 — общий термообработанный чугун

Таблица IV-54

Теплоемкость  $c_{\text{ср}}$  и удельная энтальпия  $i$  серых чугунов различного состава

| Температура, °C | $c_{\text{ср}},$<br>кДж                         | $i,$<br>кДж/кг | $c_{\text{ср}},$<br>кДж                         | $i,$<br>кДж/кг | $c_{\text{ср}},$<br>кДж                         | $i,$<br>кДж/кг | $c_{\text{ср}},$<br>кДж                        | $i,$<br>кДж/кг |
|-----------------|-------------------------------------------------|----------------|-------------------------------------------------|----------------|-------------------------------------------------|----------------|------------------------------------------------|----------------|
|                 | (кг·°C)                                         |                | (кг·°C)                                         |                | (кг·°C)                                         |                | (кг·°C)                                        |                |
|                 | Состав, %                                       |                |                                                 |                |                                                 |                |                                                |                |
|                 | 3,71 C; 1,5 Si;<br>0,63 Mn; 0,147 P;<br>0,069 S |                | 3,72 C; 1,41 Si;<br>0,88 Mn; 0,54 P;<br>0,078 S |                | 3,61 C; 2,02 Si;<br>0,80 Mn; 0,88 P;<br>0,080 S |                | 2,2 C; 1,48 Si;<br>0,73 Mn; 0,12 P;<br>0,023 S |                |
| 100             | —                                               | —              | —                                               | —              | —                                               | —              | 0,5443                                         | 54,43          |
| 200             | 0,4605                                          | 92,11          | 0,3768                                          | 75,36          | 0,2901                                          | 57,99          | —                                              | —              |
| 300             | 0,4932                                          | 147,92         | 0,4363                                          | 130,84         | 0,3761                                          | 113,46         | 0,5582                                         | 167,47         |
| 400             | 0,5079                                          | 203,14         | 0,4652                                          | 186,06         | 0,4220                                          | 168,73         | 0,5652                                         | 226,09         |
| 450             | —                                               | —              | —                                               | —              | 0,4367                                          | 196,57         | —                                              | —              |
| 500             | 0,5171                                          | 258,53         | 0,4836                                          | 241,79         | 0,4480                                          | 223,99         | 0,5862                                         | 293,08         |
| 550             | 0,5234                                          | 287,84         | 0,4911                                          | 270,05         | 0,4576                                          | 251,63         | —                                              | —              |
| 600             | 0,5346                                          | 320,83         | 0,5024                                          | 301,45         | 0,4710                                          | 282,61         | 0,6071                                         | 364,25         |
| 650             | 0,5548                                          | 360,48         | 0,5192                                          | 337,46         | 0,4861                                          | 315,89         | —                                              | —              |
| 700             | 0,6025                                          | 421,82         | 0,5543                                          | 387,91         | 0,5125                                          | 358,81         | 0,6400                                         | 447,99         |
| 750             | 0,6477                                          | 485,84         | 0,6125                                          | 459,50         | 0,5681                                          | 426,22         | —                                              | —              |
| 800             | 0,6661                                          | 532,98         | 0,6372                                          | 509,78         | 0,6075                                          | 486,09         | 0,6908                                         | 552,66         |
| 850             | 0,6736                                          | 572,75         | —                                               | —              | 0,6251                                          | 531,30         | —                                              | —              |
| 900             | 0,6766                                          | 608,76         | 0,6548                                          | 590,34         | 0,6305                                          | 568,57         | 0,7118                                         | 640,58         |
| 950             | 0,6766                                          | 642,67         | 0,6556                                          | 623,00         | 0,6343                                          | 600,81         | —                                              | —              |
| 1000            | 0,6753                                          | 675,33         | 0,6544                                          | 654,40         | 0,6322                                          | 632,21         | 0,7201                                         | 720,13         |
| 1050            | 0,6741                                          | 707,57         | 0,6519                                          | 684,54         | 0,6301                                          | 661,51         | —                                              | —              |
| 1100            | 0,6720                                          | 738,97         | 0,6510                                          | 715,94         | 0,6301                                          | 692,92         | 0,7308                                         | 803,87         |
| 1150            | 0,8847                                          | 1017,39        | 0,8608                                          | 988,08         | 0,8428                                          | 967,15         | —                                              | —              |
| 1200            | 0,8721                                          | 1046,70        | 0,8495                                          | 1019,48        | 0,8323                                          | 998,55         | 0,9071                                         | 1088,57        |
| 1250            | 0,8608                                          | 1076,01        | 0,8382                                          | 1047,96        | 0,8206                                          | 1025,77        | —                                              | —              |
| 1300            | 0,8512                                          | 1106,57        | 0,8281                                          | 1076,01        | 0,8110                                          | 1054,24        | 0,9082                                         | 1180,68        |
| 1350            | 0,8420                                          | 1136,72        | 0,8173                                          | 1103,22        | 0,8001                                          | 1080,19        | —                                              | —              |

Таблица IV-55

Влияние содержания углерода, марганца, хрома и кобальта на электросопротивление чугуна

| Содержание, % |                 |       |       |      |      |      | Удельное электросопротивление, $\rho_{\text{э}}$ , мкОм·см |                         |
|---------------|-----------------|-------|-------|------|------|------|------------------------------------------------------------|-------------------------|
| C             | C <sub>гр</sub> | Si    | Mn    | Al   | Cr   | Co   | в литом состоянии                                          | после отжига при 875 °C |
| 2,64          | 1,25            | 1,72  | 0,23  | —    | —    | —    | 61,94                                                      | 59,04                   |
| 2,82          | 1,44            | 1,74  | 0,63  | —    | —    | —    | 59,36                                                      | 59,50                   |
| 2,69          | 1,20            | 1,73  | 1,07  | —    | —    | —    | 59,40                                                      | 62,10                   |
| 2,73          | 1,32            | 1,70  | 1,49  | —    | —    | —    | 64,95                                                      | 66,15                   |
| 2,65          | —               | 1,47  | 2,66  | —    | —    | —    | 66,50                                                      | —                       |
| 3,61          | 2,65            | 0,03  | Следы | 0,87 | —    | —    | 50,30                                                      | —                       |
| 3,63          | 2,15            | 0,03  | »     | 1,52 | —    | —    | 74,60                                                      | —                       |
| 3,52          | 1,89            | 0,02  | »     | 2,3  | —    | —    | 75,00                                                      | —                       |
| 3,64          | 2,30            | 0,023 | »     | 2,60 | —    | —    | 86,25                                                      | —                       |
| 3,50          | 1,31            | 0,025 | »     | 2,83 | —    | —    | 87,10                                                      | —                       |
| 3,61          | 2,25            | 0,018 | »     | 3,60 | —    | —    | 89,30                                                      | —                       |
| 3,42          | 1,85            | 0,02  | »     | 4,09 | —    | —    | 94,70                                                      | —                       |
| 3,59          | 1,38            | 2,63  | 0,02  | —    | 0,63 | —    | 90,63                                                      | —                       |
| 2,42          | 1,48            | 3,63  | Следы | —    | 1,06 | —    | —                                                          | —                       |
| 2,45          | 1,39            | 3,12  | 0,015 | —    | 1,79 | —    | 113,5                                                      | —                       |
| 2,10          | —               | 1,17  | 0,01  | —    | 7,51 | —    | 64,6                                                       | —                       |
| 2,76          | 1,48            | 2,08  | 0,045 | —    | —    | 1,86 | 82,6                                                       | —                       |
| 2,91          | 1,34            | 0,905 | 0,02  | —    | —    | 6,51 | 68,8                                                       | —                       |
| 2,36          | 1,11            | 0,66  | 0,01  | —    | —    | 19,9 | 38,9                                                       | —                       |
| 2,20          | 1,37            | 0,65  | 0,01  | —    | —    | 23,3 | 34,4                                                       | —                       |

# МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

Таблица V-1

Предел прочности  $\sigma_B$  различных сталей в зависимости от температуры

| Марка стали | Предел прочности $\sigma_B$ , МН/м <sup>2</sup> , при температуре, °С |       |       |       |     |       |     |       |       |       |     | Термическая обработка |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-----|-------|-----|-------|-------|-------|-----|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|             | 20                                                                    | 100   | 200   | 300   | 350 | 400   | 450 | 500   | 550   | 600   | 650 |                       | 700                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 10          | 421,7                                                                 | 402,1 | 485,4 | 514,8 | —   | 372,6 | —   | 255,0 | 186,3 | 107,9 | —   | —                     | Нормализация 900—920°С<br>Состояние поставки<br>То же<br>После прокатки<br>»<br>»<br>»<br>»<br>Состояние поставки<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br>»<br> |

Нормализация 900—920°C  
 Состояние поставки  
 То же  
 После прокатки  
 >  
 >  
 >  
 Состояние поставки  
 >  
 >  
 >  
 >  
 >  
 Нормализация  
 Нагрев 950°C, воздух, отпуск 680—690°C, воздух  
 Нагрев 900—920°C, воздух, отпуск  
 630—650°C  
 Нормализация 980—1000°C, отпуск  
 740—760°C  
 Нормализация 1000—1020°C, отпуск  
 740°C, 2 ч  
 Отпуск 840—860°C, воздух  
 Нагрев 580—570°C, воздух  
 Нагрев 860—870°C, охлаждение в  
 регортах  
 Нормализация 880—900°C, отпуск  
 680—690°C, 8—12 ч

| Марка стали                                                      | Предел прочности $\sigma_B$ , МН/м <sup>2</sup> , при температуре, °С |       |       |         |         |         |          |         |          |       |       | Термическая обработка |                                                                                                                    |
|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------|-------|---------|---------|---------|----------|---------|----------|-------|-------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                  | 20                                                                    | 100   | 200   | 300     | 350     | 400     | 450      | 500     | 550      | 600   | 650   |                       | 700                                                                                                                |
| 30Х<br>38ХА<br>40Х<br>40ХМ                                       | 833,6                                                                 | 764,9 | 774,7 | 794,3   | 784,5   | 647,2   | 603,1    | 500,1   | —        | —     | —     | —                     | Закалка 860°С, масло, отпуск 500°С, HВ260—269<br>Закалка 820—840°С, масло, отпуск 550°С, 3 ч<br>То же              |
|                                                                  | 936,5                                                                 | —     | 887,5 | 877,7   | —       | 586,5   | 588,4    | 490,3   | —        | —     | —     | —                     |                                                                                                                    |
|                                                                  | 936,5                                                                 | —     | 887,5 | 877,7   | —       | 686,5   | 588,4    | 490,3   | —        | —     | —     | —                     |                                                                                                                    |
|                                                                  | 563,9                                                                 | —     | —     | 534,5** | 534,5** | 529,6** | 475,6*10 | 441,3** | 402,1*11 | —     | —     | —                     | Отжиг 850°С, закалка 860—870°С, масло, отпуск 690—700°С, охлаждение с печью до 300°С со скоростью 50°/ч, HВ170—187 |
|                                                                  | 730,6                                                                 | —     | 661,9 | 715,9   | —       | 632,5   | 578,6    | 500,1   | 460,9    | 348,1 | —     | —                     | Закалка 860—870°С, масло, отпуск 690—700°С, охлаждение с печью до 300°С со скоростью 50°/ч, HВ170—187              |
| X18H11B<br>ЭИ794<br>X14H14B2M<br>ЭИ257                           | 559,0                                                                 | —     | —     | —       | —       | —       | —        | 392,3   | —        | 362,8 | 304,0 | 245,2                 | Закалка 870—880°С, масло, отпуск 650°С                                                                             |
|                                                                  | 637,4                                                                 | —     | —     | —       | —       | —       | —        | 431,5   | —        | 382,4 | 362,8 | 304,0                 | Закалка 1050—1100°С, 30 мин, воз-дух                                                                               |
|                                                                  | 559,0                                                                 | —     | —     | —       | —       | —       | —        | —       | 464,8    | 443,3 | 425,6 | 397,2                 | То же<br>Нагрев 1100°С, воздух                                                                                     |
|                                                                  | 577,6                                                                 | —     | —     | —       | —       | —       | —        | —       | —        | 371,7 | 322,6 | 311,8                 | Нагрев 1100°С, выдержка 2 ч, воз-дух                                                                               |
|                                                                  | 563,9                                                                 | —     | —     | —       | —       | —       | —        | —       | —        | 396,2 | 351,1 | 326,6                 | Закалка 1140—1160°С, вода                                                                                          |
| X13H16B (ЭИ694)<br>X13H18B2B (ЭИ695)<br>X23H13<br>X23H18 (ЭИ417) | 583,5                                                                 | —     | —     | —       | —       | —       | —        | —       | —        | 433,4 | 387,2 | 362,8                 | Закалка 1140—1160°С, вода                                                                                          |
|                                                                  | 649,2                                                                 | —     | —     | —       | —       | —       | —        | —       | 580,6    | 523,7 | 466,8 | 379,5                 | Закалка 1050°С, вода                                                                                               |
|                                                                  | 655,1                                                                 | —     | —     | 530,5   | —       | 547,2   | —        | 530,5   | —        | 448,2 | 397,2 | 324,6                 | Закалка 1180°С, вода, старение 800°С, 4 ч                                                                          |
|                                                                  | 838,5                                                                 | —     | 686,5 | 733,5   | —       | 711,0   | —        | 686,5   | 622,7    | 568,8 | —     | 429,5                 | Нагрев 1200°С, вода, 800°С, выдержка 8 ч                                                                           |
|                                                                  | 777,7                                                                 | —     | —     | —       | —       | —       | —        | —       | 570,7    | 491,3 | 439,3 | 338,3                 | Закалка 1175°С, вода, старение 50°С, 5 ч                                                                           |
| И123<br>ЭИ572<br>ИИ400<br>ИИ403                                  | 589,4                                                                 | 531,5 | 506,0 | 462,9   | —       | 471,7   | —        | 459,0   | —        | 434,4 | —     | 395,2                 | Нормализация 1050—1100°С                                                                                           |
|                                                                  | 598,2                                                                 | —     | —     | 559,0   | —       | —       | 519,6    | 519,6   | 490,3    | 490,3 | 411,9 | 343,2                 | Закалка 1150—1180°С, вода, старе-ние 750°С, 12—15 ч                                                                |
|                                                                  | 583,4                                                                 | —     | —     | 578,6   | —       | —       | 578,6    | 578,6   | 519,6    | 509,9 | 470,7 | 421,7                 | Закалка 1150°С, вода, старение 750°С, 10 ч                                                                         |
|                                                                  | 586,4                                                                 | —     | 454,0 | 453,1   | —       | 447,2   | —        | 432,5   | —        | 396,2 | —     | 307,9                 | Закалка 1150°С, вода, старение 750°С, 10 ч                                                                         |
|                                                                  | 642,3                                                                 | —     | 519,8 | 497,2   | —       | 509,0   | —        | 464,8   | —        | 408,9 | 353,0 | 346,2                 | Закалка 1150°С, вода, старение 800°С, 16 ч                                                                         |
| ИИ405<br>ИИ395<br>ИИ424<br>ИИ612                                 | 549,2                                                                 | —     | —     | 470,7   | —       | 470,7   | 460,9    | 460,9   | 441,3    | 421,7 | 402,1 | —                     | Нормализация 1100—1130°С, старе-ние 750°С, 10—12 ч                                                                 |
|                                                                  | 637,4                                                                 | —     | —     | 508,0   | —       | 519,8   | 509,9    | 509,9   | 490,3    | 470,7 | 441,3 | —                     | Закалка 1180°С, вода, двойное ста-рение 700°С, 50 ч и 800°С, 10 ч                                                  |
|                                                                  | 863,0                                                                 | —     | 732,6 | 713,9   | —       | 703,1   | —        | 681,6   | —        | 619,8 | 534,5 | 440,3                 | Закалка 1200°С, вода, 10 ч                                                                                         |
|                                                                  | 820,2                                                                 | —     | —     | —       | —       | —       | —        | —       | —        | 607,0 | 534,5 | 445,2                 | Закалка 1200°С, вода, 10 ч                                                                                         |
|                                                                  | 784,5                                                                 | 745,3 | 725,7 | 715,9   | —       | 696,3   | 706,1    | 666,8   | 666,8    | 627,6 | 500,1 | 451,1                 | Закалка 1200°С, вода, 10 ч, старе-ние 780°С, 8—10 ч и 730°С, 25 ч                                                  |
|                                                                  | 853,2                                                                 | 794,3 | 764,9 | 735,5   | —       | 725,7   | 706,1    | 696,3   | 666,8    | 666,8 | 617,8 | 490,3                 |                                                                                                                    |

| Марка стали    | Предел прочности $\sigma_B$ , МН/м <sup>2</sup> при температуре, °С |                          |                         |                         |                 |                         |                         |                         |                         |                         |                 | Термическая обработка        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|----------------|---------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                | 20                                                                  | 100                      | 200                     | 300                     | 350             | 400                     | 450                     | 500                     | 550                     | 600                     | 650             |                              | 700                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| ЭИ434 (ХН10К)  | 816,9                                                               | —                        | —                       | 711,0                   | —               | 715,9                   | —                       | 673,7                   | —                       | 613,9                   | —               | 441,3                        | Закалка 1210°С, вода. Двойное старение 700°С, 24 ч и 850°С, 3 ч<br>Закалка 1180°С, выдержка 1 ч, вода, нагрев 1000°С, 1 ч<br>Нагрев 4200 С, вода, старение 700°С, 50 ч<br>Закалка 1080°С, выдержка 2 ч, вода 1000°С, 1 ч, воздух 700°С, 16 ч<br>закалка 1100°С, выдержка 5 ч, вода; тройное ступенчатое старение |
|                | 918,9                                                               | —                        | —                       | —                       | —               | —                       | —                       | —                       | —                       | —                       | 625,7           | —                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|                | ЭИ4612К                                                             | 637,4<br>735,5<br>1061,1 | —<br>—<br>—             | —<br>—<br>—             | —<br>—<br>908,1 | —<br>—<br>—             | —<br>—<br>826,7         | —<br>—<br>—             | —<br>—<br>787,5         | —<br>—<br>—             | —<br>—<br>604,1 | —<br>441,3<br>509,9<br>539,4 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| ЭИ4473 (ХН80Т) | 1029,7                                                              | —                        | —                       | —                       | —               | —                       | —                       | —                       | —                       | —                       | 686,5<br>735,5  | —                            | То же<br>Отжиг 900°С<br>Закалка 850—860°С, через воду в масло, отпуск 630°С<br>То же<br>Закалка 930—950°С, масло, отпуск 620—660°С                                                                                                                                                                               |
| ЭИ607          | —                                                                   | —                        | —                       | —                       | —               | —                       | —                       | —                       | —                       | —                       | —               | 392,3                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| ЭИ607А         | 480,5                                                               | —                        | —                       | —                       | —               | —                       | —                       | —                       | —                       | —                       | —               | —                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 25Л            | 421,7<br>480,5<br>608,0                                             | 402,1<br>451,1<br>617,8  | 362,8<br>421,7<br>612,9 | 372,6<br>451,1<br>588,4 | —               | 343,2<br>451,1<br>549,2 | 225,6<br>343,2<br>524,6 | 225,6<br>294,2<br>441,3 | 196,1<br>246,2<br>397,2 | 107,9<br>156,9<br>255,0 | —               | —                            | Двойная нормализация: 970—980 и 930—950°С, отпуск 680—700°С<br>Нормализация 1030—1050°С, отпуск 650—660°С, 6 ч, воздух<br>Нормализация 1150°С, закалка 1050°С, масло, отпуск 700°С<br>Улучшение, НВ 187—207                                                                                                      |
| 35ХМ, 34ХМ     | 706,1                                                               | —                        | —                       | 735,5                   | —               | 578,6                   | 688,4                   | 505,0                   | 436,4                   | 338,3                   | —               | —                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 35ХМФА         | 727,6<br>839,4<br>878,7                                             | —<br>—<br>—              | —<br>—<br>—             | —<br>—<br>—             | —               | 714,9                   | —                       | 625,7                   | 549,2                   | —                       | —               | —                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 25Х2МФА        | 1049,3                                                              | —                        | —                       | —                       | —               | —                       | —                       | —                       | —                       | —                       | —               | —                            | Закалка в масле и отпуск                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Р2             | 676,6                                                               | —                        | —                       | —                       | —               | —                       | 554,1                   | 505,0                   | 460,9                   | —                       | —               | —                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| ЭИ723          | 1078,7                                                              | —                        | —                       | —                       | —               | —                       | —                       | 820,8                   | 751,2                   | 706,1                   | —               | —                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| ЭИ415          | 836,5                                                               | —                        | —                       | 737,5                   | —               | 740,4                   | 537,4                   | 625,7                   | 560,9                   | 432,5                   | —               | —                            | Нормализация 1150°С, закалка 1050°С, масло, отпуск 700°С<br>Улучшение, НВ 187—207                                                                                                                                                                                                                                |
| 21Н5           | 631,4<br>686,5<br>701,2                                             | 588,4<br>667,0           | 608,0<br>652,1          | 637,4<br>627,6          | —               | 529,6<br>549,2          | 460,9<br>431,5          | 353,0<br>372,7          | 235,4<br>274,6          | 171,6<br>210,8          | —               | —                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 40Н            | 725,7                                                               | —                        | —                       | —                       | —               | —                       | —                       | —                       | —                       | —                       | —               | —                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 40ХН           | 789,4                                                               | 761,0                    | 753,2                   | 686,5                   | —               | 538,4                   | —                       | 485,4                   | —                       | 353,0                   | —               | —                            | Нормализация, ВН 197<br>Нормализация 880—900°С, отпуск 680°С, 3 ч<br>Улучшение НВ 293—311<br>Отжиг 860°С, закалка 820—830°С через воду в масло, отпуск 670—680°С                                                                                                                                                 |
| 12ХН3А         | 549,3<br>578,6                                                      | 519,8<br>578,6           | 514,8<br>502,2          | 639,4<br>916,9          | —               | 465,8<br>828,7          | 441,3<br>755,1          | 348,1<br>686,5          | —                       | 201,0                   | —               | —                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 34ХН3М         | 1010,1                                                              | 980,7                    | 902,2                   | 916,9                   | —               | 740,4                   | 647,2                   | 549,2                   | 578,6                   | 392,3                   | —               | —                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 35ХН3МФ        | 843,4<br>933,6                                                      | —                        | 794,3                   | 814,0                   | —               | —                       | —                       | —                       | 459,9                   | 333,4                   | —               | —                            | Закалка 860°С, масло, отпуск 600°С<br>То же, отпуск 550°С<br>Закалка 930—940°С, масло, отпуск 660°С, 5 ч, воздух, НВ 255                                                                                                                                                                                         |
| 50ХФА          | 1127,8                                                              | —                        | 1054,2                  | 1078,7                  | —               | 814,0                   | —                       | 537,4                   | —                       | —                       | —               | —                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 60С2           | 1044,4                                                              | —                        | 961,1                   | 951,2                   | —               | 706,1                   | —                       | 441,3                   | —                       | —                       | —               | —                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 38ХМЮА         | 809,0                                                               | —                        | 784,5                   | 814,0                   | —               | 725,7                   | —                       | 470,7                   | —                       | 299,1                   | —               | —                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

Предел прочности  $\sigma_B$ , МН/м<sup>2</sup> при температуре, °С

| Марка стали       | 20                           | 100         | 200            | 300            | 350            | 400            | 450            | 500            | 550            | 600             | 650                  | 700             | Термическая обработка                                                           |
|-------------------|------------------------------|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 1X13              | 603,1                        | —           | 529,6          | —              | —              | 490,3          | —              | 362,8          | —              | 225,6           | —                    | —               | Нагрев 1030—1050°C, масло, отпуск 750°C                                         |
| 2X13              | 706,1                        | —           | —              | 539,4          | —              | 519,8          | 485,4          | 431,5          | 343,2          | —               | —                    | —               | Нормализация 1000—1020°C, воздух, отпуск 720—750°C                              |
| 3X13              | 946,3                        | —           | 818,9          | 783,6          | —              | 706,1          | —              | 608,0          | 529,6          | 451,1           | —                    | —               | Нормализация 1000°C, отпуск 650°C                                               |
| 4X13              | 1118,4                       | —           | 941,4          | 902,3          | —              | 779,6          | —              | 519,8          | —              | 304,0           | —                    | —               | Нагрев 1050°C, воздух, отпуск 600°C, 3 ч                                        |
| X10C2M (ЭИ107)    | 941,4                        | 844,4       | 818,9          | 833,6          | —              | 784,9          | —              | 666,9          | —              | 431,5           | —                    | 220,6           | Закалка 1100°C, масло, отпуск 800°C, вода, НВ 229                               |
| 15X11MФ           | 730,6                        | —           | —              | —              | —              | —              | —              | —              | 529,6          | 441,3           | —                    | —               | Нормализация 1050°C, отпуск 740°C, 2 ч, НВ269                                   |
| ЭИ802 (15X12БМФ)  | 872,8                        | —           | 735,5          | 715,9          | —              | 671,8          | —              | 549,2          | 505,0          | 372,7           | 294,2                | —               | Закалка 1000°C, масло, отпуск 680°C, 10 ч                                       |
| ЭИ756 (1X12Б2МФ)  | 870,8                        | —           | —              | —              | —              | —              | —              | —              | —              | 437,4           | 379,5 <sup>11*</sup> | —               | Закалка 1050°C, масло, отпуск 680°C, 3 ч, воздух, НВ 270                        |
| 1X18H9T (ЭЯ1Т)    | 539,4                        | 431,5       | 372,7          | 284,4          | —              | 259,9          | —              | 294,2          | 397,2          | 279,5           | 294,2                | 289,3           | Закалка 1130—1160°C, воздух или вода, старение 800°C, 10 ч или 700°C, 20 ч      |
| 1X18H12T<br>20XНЛ | 644,3<br>{<br>470,7<br>549,2 | —<br>—<br>— | —<br>—<br>—    | —<br>—<br>—    | —<br>—<br>—    | 431,5          | 411,9          | 470,7<br>377,6 | 333,4          | 411,9<br>289,3  | 364,7<br>235,4       | 306,9           | Закалка 1050—1100°C, воздух Нормализация 880—910°C, отпуск 640—660°C            |
| 20XМФЛ            | 490,3<br>{<br>676,6          | —<br>—      | 470,7<br>608,0 | 480,5<br>608,0 | —<br>—         | 470,7<br>559,0 | 451,1<br>549,2 | 431,5<br>509,9 | 313,8<br>460,9 | 274,6<br>402,1  | —                    | 218,7           | Двойная нормализация 940—950 и 920°C, отпуск 650—710°C                          |
| 1X18H9TЛ          | 598,2<br>{<br>657,0          | —<br>—      | —<br>—         | —<br>—         | 333,4<br>372,7 | 353,0<br>372,7 | 353,0          | 343,2          | 304,0          | 274,6           | 274,6                | 225,6—<br>255,0 | Нагрев 1100°C, выдержка 4 ч, воздух, отпуск 800°C, выдержка, охлаждение с печью |
| X25H13TЛ          | 490,3<br>{<br>598,2          | —<br>—      | —<br>—         | —<br>—         | —<br>—         | —<br>—         | —<br>—         | —<br>—         | 407,0          | 382,5—<br>402,1 | 382,5                | —               | Нагрев 1160—1160°C, воздух, старение 700 и 760—780°C, 10 ч                      |
| ЛЛ1, ЛЛ4, ЛЛ5     | 431,5<br>{<br>519,8          | —<br>—      | —<br>—         | —<br>—         | —<br>—         | —<br>—         | —<br>—         | —<br>—         | —              | —               | 284,4—<br>382,5      | 245,2           | Нагрев 1150—1170°C, воздух, старение 770—800°C, 10 ч                            |
| ЛЛ3               | 451,1<br>{<br>573,7          | —<br>—      | —<br>—         | —<br>—         | —<br>—         | —<br>—         | —<br>—         | 343,2<br>509,5 | —              | 294,2—<br>353,0 | 274,6—<br>323,6      | 274,6—<br>323,6 | Нормализация 1180°C, отпуск 800°C, 4 ч                                          |
| ЛЛ6               | 333,4<br>{<br>460,9          | —<br>—      | —<br>—         | —<br>—         | —<br>—         | —<br>—         | —<br>—         | —<br>—         | 279,6          | 255,0—<br>274,6 | 265,0—<br>274,6      | —               | Нормализация 1180°C, двойное старение 800°C, 6 ч и 750°C, 16 ч НВ 156           |

\* При 480°C. \*\* При 520°C. \*\*\* При 560°C. \*\*\*\* При 580°C. \*\*\*\*\* При 540°C. \*\* При 580°C. \*\* При 620°C. \*\*\* При 320°C. \*\*\*\* При 370°C. \*\*\*\*\* При 420°C. \* При 470°C. \* При 570°C.  
 \* При 625°C.

Таблица V-2

## Основные свойства некоторых жароупорных сталей

| Тип, марка стали                      | Температура плавления $t_{пл}$ , °C | Температура начала интенсивного окисления на воздухе $t_{ок}$ , °C | Предел прочности при растяжении $\sigma_B$ , МН/м <sup>2</sup>                                        | Условный предел ползучести при удлинении на 1% за 10 000 ч $\sigma_{пл}$ , МН/м <sup>2</sup>                    | Допустимое напряжение $\sigma_{доп}$ , МН/м <sup>2</sup>                                    | Область применения                                                                                                                                                                |
|---------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Хромистые:<br>X18 (ЭИ229)             | 1490—1510                           | 850—900                                                            | 490,3;<br>200;<br>245,2;<br>600;<br>490,3;<br>400;<br>186,3;<br>700                                   | 88,3;<br>500;<br>9,8;<br>700;<br>98,07;<br>500;<br>6,9;<br>700                                                  | 25,5;<br>600;<br>1,470;<br>800                                                              | Нержавеющие и окалиностойкие стали могут применяться до 800—900°C в ненагруженном состоянии                                                                                       |
| Высокохромистые:<br>X25 (ЭИ181)       | 1490—1510                           | 1100—1150                                                          | 416,8;<br>400;<br>78,5                                                                                | 29,4;<br>600;<br>2,9                                                                                            | 24,5;<br>600;<br>5,9                                                                        | Окалиностойкие стали могут применяться до 1100—1500°C для деталей в ненагруженном состоянии, а также для выводов нагревателей печей до 1000°C; трубок для термонар (Х25Т) и т. д. |
| X25Т (ЭИ439)                          | —                                   | —                                                                  | 800;<br>39,2;<br>900                                                                                  | 800;<br>0,294;<br>850                                                                                           | 700;<br>1,470;<br>800                                                                       |                                                                                                                                                                                   |
| X28 (ЭЖ27, ЭИ349)                     | —                                   | —                                                                  | —                                                                                                     | —                                                                                                               | —                                                                                           |                                                                                                                                                                                   |
| Сильхромоновые:<br>X9С2 (ЭСХ8)        | 1470—1490                           | 800                                                                | 882,6—1078,6;<br>20                                                                                   | —                                                                                                               | —                                                                                           | Окалиностойкие стали могут применяться для деталей печей и выводов нагревателей соответственно до 880 и 1060°C.                                                                   |
| X25С3Н (ЭИ261)                        | 1470—1490                           | 1100                                                               | 980,7—1176,8;<br>20                                                                                   | —                                                                                                               | —                                                                                           |                                                                                                                                                                                   |
| Высоколегированные:<br>X23Н18 (ЭИ417) | 1400—1430                           | 1000                                                               | 588,4—686,5;<br>20;<br>470,7—617,8;<br>400;<br>235,4—323,6;<br>800;<br>588,4;<br>20;<br>343,2;<br>800 | 539,4—657,0;<br>200;<br>382,5—519,8;<br>600;<br>58,8—78,5;<br>1000;<br>411,9;<br>700;<br>166,7;<br>900;<br>1000 | 49,0—68,6;<br>600;<br>9,8—17,7;<br>800;<br>4,9—6,9;<br>900;<br>24,5;<br>700;<br>4,9;<br>900 | Окалиностойкие и жаропрочные стали могут применяться для изготовления нагруженных деталей до 900 и 1000°C соответственно                                                          |
| X20Н35                                | 1400—1420                           | 1100                                                               | 78,5;<br>78,5;<br>900;<br>1000                                                                        | 21,6;<br>800;<br>1,96;<br>1000                                                                                  | 1000;<br>800;<br>1,470;<br>1000                                                             |                                                                                                                                                                                   |

\* В знаменателе дается температура определения (°C) соответствующих свойств.

Таблица V-3

Предел прочности некоторых марок стали и сплавов  
при повышенных температурах  
(испытания при прямом нагреве)

| Марка стали<br>или сплава | Предел прочности $\sigma_B$ , МН/м <sup>2</sup> , при температуре, °С |       |       |      |      |      |      |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------|-------|------|------|------|------|
|                           | 700                                                                   | 800   | 900   | 1000 | 1100 | 1200 | 1300 |
| 15                        | 54,9                                                                  | 56,9  | 44,1  | 27,4 | 23,5 | 13,7 | —    |
| У7                        | 84,3                                                                  | 59,8  | 37,3  | 30,4 | 18,6 | 10,8 | —    |
| У12                       | 70,6                                                                  | 67,7  | 27,5  | 23,5 | 14,7 | 12,7 | —    |
| 12ХН3А                    | 127,5                                                                 | 79,4  | 51,0  | 39,2 | 27,5 | 15,7 | 12,7 |
| 18ХНВА                    | 224,6                                                                 | 110,8 | 64,7  | 48,1 | 26,5 | 18,6 | 14,7 |
| 30ХГСА                    | 95,1                                                                  | 72,6  | 41,2  | 35,3 | 21,6 | 17,6 | —    |
| 60СА                      | 163,4                                                                 | 79,4  | 55,9  | 33,3 | 25,5 | 32,4 | 5,9  |
| Х12М                      | 140,2                                                                 | 122,6 | 81,4  | 46,1 | 24,5 | 7,8  | —    |
| P9                        | 192,2                                                                 | 90,2  | 81,4  | 55,9 | 32,4 | 20,6 | —    |
| P18                       | 221,6                                                                 | 111,8 | 107,9 | 66,7 | 31,4 | 20,6 | —    |
| 1Х13                      | 64,7                                                                  | 35,3  | 26,5  | 36,3 | 21,6 | 11,8 | —    |
| Х9С2                      | 137,3                                                                 | 51,0  | 58,8  | 45,1 | 22,6 | 15,7 | —    |
| Х17                       | 84,3                                                                  | 40,2  | 21,6  | 20,6 | 13,7 | 7,8  | 5,9  |
| Х28                       | 75,5                                                                  | 25,5  | 18,6  | 10,8 | 7,8  | 7,8  | —    |
| 1Х25105                   | 173,6                                                                 | 80,4  | 47,1  | 19,6 | 9,8  | 5,9  | —    |
| 1Х18Н9                    | 211,8                                                                 | 119,6 | 67,7  | 38,2 | 30,4 | 15,7 | —    |
| 1Х18Н9Т                   | —                                                                     | 181,4 | 89,2  | 53,9 | 37,3 | 17,6 | —    |
| Х18Н11Б                   | —                                                                     | 148,1 | —     | 53,0 | —    | 19,6 | 9,8  |
| Х18Н25С2                  | 331,5                                                                 | 78,5  | 100,0 | 61,8 | 30,4 | 21,6 | —    |
| Х23Н18                    | 266,7                                                                 | 138,4 | 90,2  | 53,9 | 51,0 | 28,4 | 13,7 |
| Х13Н4Г9                   | 220,6                                                                 | 143,2 | 69,6  | 43,1 | 22,6 | 13,7 | —    |
| Х14Н14В2М                 | —                                                                     | —     | 143,2 | 70,6 | 43,1 | 26,5 | —    |
| Х15Н60                    | 286,4                                                                 | 166,7 | 104,0 | 58,8 | 38,2 | 26,5 | —    |
| Х20Н80                    | 436,4                                                                 | 213,8 | 92,2  | 71,6 | 35,3 | 22,6 | —    |

# ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕХНИЧЕСКИХ И ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ОГНЕУПОРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

## ТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица VI-1

Физические свойства различных технических материалов

| Материал                                 | Влажность по<br>массе $W$ ,<br>% | Плотность $\rho$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> | Темпе-<br>ратура<br>$t$ , °C | Коэффициент<br>теплопровод-<br>ности $\lambda$ ,<br>Вт/(м·°C) | Теплоем-<br>кость $c$ ,<br>кДж |
|------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|                                          |                                  |                                         |                              |                                                               | (кг·°C)                        |
| Асфальт . . . . .                        | 0                                | 2120                                    | 0—30                         | 0,61—0,74                                                     | 1,67                           |
| Бакелитовый лак . . . . .                | —                                | 1400                                    | —                            | 0,29                                                          | —                              |
| Бетон с каменным щебнем . . . . .        | 8                                | 2000                                    | 20                           | 1,28                                                          | 0,84                           |
| Бетон сухой . . . . .                    | 0                                | 1600                                    | 20                           | 0,84                                                          | 0,84                           |
| Железобетон . . . . .                    | 8                                | 2200                                    | 20                           | 1,55                                                          | 0,84                           |
| Шлакобетон . . . . .                     | 13                               | 1500                                    | 20                           | 0,69                                                          | 0,79                           |
| Бумага обыкновенная . . . . .            | Воздушно-<br>сухая               | —                                       | 20                           | 0,14                                                          | 1,50                           |
| Вата хлопчатобумажная . . . . .          | То же                            | 80                                      | 30                           | 0,042                                                         | —                              |
| Гипс:                                    |                                  |                                         |                              |                                                               |                                |
| формованный . . . . .                    | 5                                | 1250                                    | 20                           | 0,43                                                          | 0,84—<br>0,92                  |
| обожженный . . . . .                     | —                                | 1650                                    | —                            | 0,29                                                          | 0,84                           |
| Глина . . . . .                          | 15—20                            | 2000—1600                               | 20                           | 0,93—0,69                                                     | 0,84                           |
| Глина огнеупорная . . . . .              | 0                                | 1845                                    | 430                          | 1,04                                                          | 1,04                           |
| Гравий . . . . .                         | Воздушно-<br>сухой               | 1840                                    | 20                           | 0,36                                                          | —                              |
| Замаска Менделеева . . . . .             | —                                | 950                                     | —                            | 0,13                                                          | —                              |
| Замша . . . . .                          | Воздушно-<br>сухая               | 340                                     | —                            | 0,053                                                         | —                              |
| Земля . . . . .                          | { Сухая<br>влажная               | 1500<br>1700                            | —<br>—                       | 0,14<br>0,66                                                  | —<br>2,00                      |
| Дерево:                                  |                                  |                                         |                              |                                                               |                                |
| дуб поперек волокон . . . . .            | 6—8                              | 825                                     | 0—15                         | 0,19—0,21                                                     | 2,39                           |
| дуб вдоль волокон . . . . .              | 6—8                              | 819                                     | 12—50                        | 0,35—0,43                                                     | 2,39                           |
| сосна поперек волокон . . . . .          | 8                                | 546                                     | 0—50                         | 0,14—0,16                                                     | 2,72                           |
| сосна вдоль волокон . . . . .            | 8                                | —                                       | 20—25                        | 0,35—0,41                                                     | 2,72                           |
| фанера клеевая . . . . .                 | 0                                | 600                                     | 0                            | 0,15                                                          | 2,51                           |
| Древесный уголь кусковой . . . . .       | Естествен-<br>ной влаж-<br>ности | 190                                     | 80                           | 0,074                                                         | —                              |
| Известняк . . . . .                      | —                                | 2700                                    | —                            | 0,69—0,93                                                     | 0,58                           |
| Картон . . . . .                         | Воздушно-<br>сухой               | —                                       | 20                           | 0,14—0,35                                                     | 1,51                           |
| Кембрик (лакированный) . . . . .         | —                                | —                                       | 38                           | 0,157                                                         | —                              |
| Каменный уголь . . . . .                 | —                                | 1400                                    | 20                           | 0,19                                                          | 1,31                           |
| Кирпич:                                  |                                  |                                         |                              |                                                               |                                |
| красный машинной фор-<br>мовки . . . . . | Воздушно-<br>сухой               | 1800                                    | 0                            | 0,77                                                          | 0,88                           |
| ручной . . . . .                         | »                                | 1700                                    | 0                            | 0,69                                                          | 0,88                           |
| силикатный . . . . .                     | »                                | 1900                                    | 0                            | 0,81                                                          | 0,84                           |
| Кладка из красного кирпи-<br>ча:         |                                  |                                         |                              |                                                               |                                |
| на холодном растворе . . . . .           | »                                | 1700                                    | 0                            | 0,81                                                          | 0,88                           |
| на теплом растворе . . . . .             | »                                | 1600                                    | 0                            | 0,67                                                          | 0,84                           |

| Материал                                   | Влажность по массе $W$ , % | Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | Температура $t$ , °C | Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·°C) | Теплоемкость $c$ , кДж/(кг·°C) |
|--------------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|----------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------|
| Кладка из силикатного кирпича:             |                            |                                      |                      |                                                    |                                |
| на холодном растворе                       | Воздушно-сухая             | 1900                                 | 0                    | 0,87                                               | 0,84                           |
| на теплом растворе                         | »                          | 1700                                 | 0                    | 0,76                                               | 0,80                           |
| Кладка бутовая из камней средней плотности | »                          | 2000                                 | 0                    | 1,28                                               | 0,88                           |
| Карболит черный                            | »                          | 1150                                 | 50                   | 0,138                                              | —                              |
| Кожа                                       | »                          | —                                    | 20                   | 0,14—0,16                                          | —                              |
| Кокс порошкообразный                       | 0                          | 449                                  | 100                  | 0,19                                               | 1,21                           |
| Котельная накипь:                          |                            |                                      |                      |                                                    |                                |
| богатая гипсом                             | 0                          | 2000—2700                            | 100                  | 0,69—2,33                                          | —                              |
| богатая известью                           | 0                          | 1000—2500                            | 100                  | 0,15—2,33                                          | —                              |
| богатая силикатами                         | 0                          | 300—1200                             | 100                  | 0,08—0,23                                          | —                              |
| Кварц кристаллический:                     |                            |                                      |                      |                                                    |                                |
| поперек оси                                | —                          | —                                    | 0                    | 7,2                                                | —                              |
| вдоль оси                                  | —                          | 0                                    | 0                    | 13,6                                               | —                              |
| Ламповая сажа                              | Воздушно-сухая             | 165                                  | 40                   | 0,069—0,12                                         | —                              |
| Лед                                        | —                          | 920                                  | 0                    | 2,25                                               | 2,26                           |
| Льняная ткань                              | Воздушно-сухая             | —                                    | —                    | 0,088                                              | —                              |
| Мел                                        | Воздушно-сухой             | 2000                                 | 50                   | 0,93                                               | 0,88                           |
| Миканит                                    | —                          | —                                    | 20                   | 0,21—0,41                                          | —                              |
| Мрамор                                     | —                          | 2800                                 | 0                    | 1,30—3,49                                          | 0,92                           |
| Парафин                                    | —                          | 920                                  | 20                   | 0,27                                               | 3,35                           |
| Пробковые плиты                            | 0                          | 147—198                              | 80                   | 0,04—0,05                                          | 1,76                           |
| Плексиглас                                 | —                          | —                                    | 20                   | 0,184                                              | —                              |
| Песок                                      | { Сухой<br>Влажный         | 1500<br>1650                         | 20<br>20             | 0,33<br>1,13                                       | 0,79<br>2,09                   |
| Резина:                                    |                            |                                      |                      |                                                    |                                |
| твердая обыкновенная                       | —                          | 1200                                 | 0—100                | 0,157—1,161                                        | 1,38                           |
| мягкая                                     | —                          | —                                    | 20                   | 0,13—0,16                                          | 1,38                           |
| пористая                                   | Воздушно-сухая             | 160                                  | —                    | 0,05                                               | —                              |

| Материал                        | Влажность по массе $W$ , % | Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | Температура $t$ , °C | Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·°C) | Теплоемкость $c$ , кДж/(кг·°C) |
|---------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|----------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------|
| Сахарный песок . . . . .        | { Воздушно-сухой           | 1600                                 | 0                    | 0,58                                               | 1,26                           |
| Сера ромбическая . . . . .      |                            | 930                                  | 20                   | 0,14                                               | 1,26                           |
| Сланец . . . . .                | Воздушно-сухая             | —                                    | 21                   | 0,28                                               | 0,76                           |
| Слюда (поперек слоев) . . . . . | Воздушно-сухой             | —                                    | 94                   | 1,49                                               | —                              |
| Снег . . . . .                  | —                          | 1600—3200                            | 20                   | 0,47—0,58                                          | 0,88                           |
| Стекло:                         | —                          | 200—400                              | —                    | 0,47                                               | 2,09                           |
| зеркальное . . . . .            | —                          | 2550                                 | 0—100                | 0,78—0,88                                          | 0,78                           |
| обыкновенное . . . . .          | —                          | 2500                                 | —                    | 0,74+0,001 $t$                                     | 0,67                           |
| термометрическое . . . . .      | —                          | 2590                                 | 20                   | 0,97                                               | —                              |
| пирекс . . . . .                | {                          | —                                    | 0                    | 1,04                                               | —                              |
|                                 |                            | —                                    | 400                  | 1,55                                               | —                              |
|                                 |                            | 2210                                 | —180                 | 0,71                                               | —                              |
|                                 |                            | —                                    | —100                 | 1,08                                               | —                              |
|                                 |                            | —                                    | 0                    | 1,35                                               | —                              |
|                                 |                            | —                                    | 100                  | 1,42                                               | —                              |
|                                 |                            | —                                    | 200                  | 1,49                                               | —                              |
|                                 |                            | —                                    | 300                  | 1,60                                               | —                              |
| кварцевое . . . . .             |                            | —                                    | 400                  | 1,76                                               | —                              |
|                                 |                            | —                                    | 600                  | 2,08                                               | —                              |
|                                 |                            | —                                    | 800                  | 2,39                                               | —                              |
|                                 |                            | —                                    | 1000                 | 2,72                                               | —                              |
|                                 |                            | —                                    | 1200                 | 3,05                                               | —                              |
| молибденовое . . . . .          | —                          | —                                    | —                    | 0,81+0,001 $t$                                     | —                              |
| Сукно . . . . .                 | 0                          | 250                                  | —                    | 0,052                                              | —                              |
| Текстолит . . . . .             | —                          | 1300—1400                            | 20                   | 0,23—0,34                                          | 1,47—1,51                      |
| Фарфор . . . . .                | {                          | 2400                                 | 95                   | 1,04                                               | 1,09                           |
|                                 |                            | 2400                                 | 1055                 | 1,97                                               | 1,09                           |
| Фибра красная . . . . .         | —                          | 1290                                 | 20—100               | 0,47—0,50                                          | —                              |
| Фибролит . . . . .              | 0                          | 360—440                              | 80                   | 0,073—0,128                                        | —                              |
| Целлулоид . . . . .             | —                          | 1400                                 | 30                   | 0,21                                               | —                              |
| Шелк . . . . .                  | —                          | 100                                  | 0—93                 | 0,043—0,58                                         | —                              |
| Шерстяная ткань . . . . .       | 0                          | 240                                  | —                    | 0,052                                              | —                              |
| Шлак котельный . . . . .        | —                          | 1000                                 | 0                    | 0,29                                               | 0,75                           |
| Штукатурка:                     |                            |                                      |                      |                                                    |                                |
| известковая . . . . .           | 6—8                        | 1600                                 | 0                    | 0,69                                               | 0,84                           |
| цементно-песчаная . . . . .     | 5—6                        | 1800                                 | 0                    | 1,163                                              | 0,84                           |
| Шлакобетон в куске . . . . .    | —                          | 2150                                 | —                    | 0,93                                               | 0,88                           |
| Эбонит . . . . .                | —                          | 1200                                 | 20                   | 0,157—0,174                                        | —                              |

## Насыпная масса (плотность) шихтовых и других материалов

| Материал                                                   | Насыпная масса<br>(плотность)<br>$\rho$ , кг/м <sup>3</sup> |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Железные руды:                                             |                                                             |
| магнитный железняк                                         | 2500—3500                                                   |
| красный железняк                                           | 2000—2800                                                   |
| бурый железняк                                             | 1200—2000                                                   |
| Агломерат железной руды                                    | 1700—2000                                                   |
| Марганцевая руда                                           | 1700—2000                                                   |
| Окалина                                                    | 1900—2000                                                   |
| Известняк                                                  | 1400—1700                                                   |
| Шлак:                                                      |                                                             |
| сварочный                                                  | 2000—2200                                                   |
| мартеновский                                               | 1600—1800                                                   |
| бессемеровский                                             | 1600—1800                                                   |
| гранулированный доменный с содержанием 20—30% влаги        | 500—700                                                     |
| Стружка стальная дробленая, мелкий чугунный и стальной лом | 1800—2200                                                   |
| Скrap крупный, чушковый чугун                              | 2800—3200                                                   |
| Лом:                                                       |                                                             |
| железный тяжелый                                           | 2500—3100                                                   |
| железный средний                                           | 1100—2000                                                   |
| железный легкий                                            | 300—1000                                                    |
| железный — трубы                                           | До 1000                                                     |
| Магнезит (порошковый)                                      | 2100—2160                                                   |
| Доломит                                                    | 1680—1740                                                   |
| Кварц                                                      | 1370—1560                                                   |
| Кокс                                                       | 450—500                                                     |
| Древесный уголь:                                           |                                                             |
| березовый                                                  | 170—200                                                     |
| сосновый                                                   | 120—150                                                     |
| еловый и пихтовый                                          | 100—130                                                     |
| Масса 1 м <sup>3</sup> металла и шлака                     |                                                             |
| Жидкий чугун                                               | 6800—7000                                                   |
| Жидкий доменный шлак                                       | 1800—2200                                                   |
| Жидкая сталь                                               | 6900                                                        |
| Жидкий мартеновский шлак                                   | ~3000                                                       |

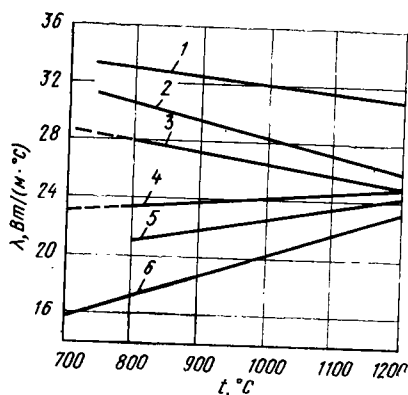


Рис. 34. Зависимость коэффициента теплопроводности  $\lambda$  шихты мартеновской печи от температуры при пористости шихты, %:  
1—0; 2—3; 3—5; 4—10; 5—20; 6—46

Таблица VI-3

Средние теплоемкости  $c_{\text{ср}}$ , кДж/(кг·°С) некоторых минералов (от 0 до t°С)

| t, °С | Свинцовый блеск | Медный блеск | Пиротин | Пирит  | Цинковая обманка железистая | Цинковая обманка |
|-------|-----------------|--------------|---------|--------|-----------------------------|------------------|
| 100   | 0,2093          | 0,5995       | 0,6979  | 0,5376 | 0,5347                      | 0,4744           |
| 300   | 0,2160          | 0,7076       | 0,8487  | —      | 0,5401                      | 0,5146           |
| 400   | 0,2177          | 0,6711       | 0,7905  | —      | 0,5531                      | 0,5246           |
| 500   | 0,2198          | 0,6376       | 0,7746  | —      | 0,5568                      | 0,5275           |
| 600   | 0,2261          | 0,6192       | 0,7619  | —      | 0,5819                      | 0,5334           |
| 700   | —               | 0,6037       | 0,7612  | —      | 0,5966                      | 0,5351           |
| 800   | —               | 0,5832       | 0,7369  | —      | 0,5673                      | 0,5359           |
| 900   | —               | 0,5744       | 0,7356  | —      | 0,5878                      | 0,5279           |
| 1000  | —               | 0,5748       | 0,7369  | —      | —                           | —                |
| 1100  | —               | 0,5732       | 0,7423  | —      | —                           | —                |
| 1200  | —               | —            | 0,9278  | —      | —                           | —                |

Таблица VI-4

Теплофизические свойства графита

| Характеристики                                                                | Направление<br>потока | Температура, °C |        |        |        |      |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------|--------|--------|--------|------|
|                                                                               |                       | 20              | 200    | 400    | 600    | 800  |
| Коэффициент теплопроводности<br>$\lambda$ , Вт/(м·°C) графита:                |                       |                 |        |        |        |      |
| кристаллический . . . . .                                                     |                       | 354,7           | 308,2  | —      | —      | —    |
| естественный . . . . .                                                        | ⊥                     | 195,4           | 144,2  | 112,8  | 91,9   | 75,6 |
| прессованный . . . . .                                                        |                       | 157             | 118,6  | 93,0   | 69,8   | 63,9 |
| искусственный, с $\rho = 1,76$ г/см <sup>3</sup>                              | ⊥                     | 104,7           | 81,4   | 69,8   | 58,2   | —    |
| то же, с $\rho = 1,55$ г/см <sup>3</sup> . . . . .                            |                       | 130,3           | 102,3  | 79,1   | 63,9   | 53,5 |
| Сопротивление разрыву $\sigma_{\text{п.л.}}$ ,<br>МН/м <sup>2</sup> . . . . . |                       | 14,2            | 15,2   | 15,9   | 16,5   | 17,6 |
|                                                                               | ⊥                     | 10,3            | 11,3   | 12,0   | 12,5   | 13,7 |
| Модуль упругости $E$ , МН/м <sup>2</sup> . . . . .                            |                       | 5880            | 7100   | 7350   | 7500   | 7840 |
|                                                                               | ⊥                     | 2700            | 3040   | 3200   | 3630   | 3920 |
| Теплоемкость $c$ , кДж/(м·°C)                                                 | —                     | 0,71            | 1,17   | 1,47   | 1,68   | 1,88 |
| Электросопротивление $\rho_a \cdot 10^4$ ,<br>Ом·см . . . . .                 | —                     | 16              | 13     | 11     | 10     | 9    |
| Коэффициент линейного рас-<br>ширения $\beta \cdot 10^6$ , 1/°C . . . . .     |                       | 7,2*1           | 8,5*2  | 10,0*3 | 13,0*4 | —    |
|                                                                               | ⊥                     | 4,0*1           | 5,5*2  | 6,8*3  | 9,3*4  | —    |
|                                                                               |                       | 1,8*1           | 1,55*2 | 1,45*3 | 1,40*4 | —    |

Примечание. Величины  $\sigma_{\text{п.ц}}$ ,  $E$ ,  $c$ ,  $\rho$ ,  $\beta$  приведены для графита с объемной массой  $\rho = 1,7$  г/см<sup>3</sup>.

\*1 При 0—500°С. \*2 При 0—1000°С. \*3 При 0—1500°С. \*4 При 0—2000°С.

Свойства измельченного графита при 20°C в зависимости от ситового состава изменяются следующим образом:

| Свойства                                | Размер сита, °отв/см² |       |       |               |
|-----------------------------------------|-----------------------|-------|-------|---------------|
|                                         | 3                     | 6     | 16    | (сieve сухая) |
| Плотность, кг/м³                        | 700                   | 480   | 420   | 165           |
| Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C) | 1,20                  | 0,384 | 0,186 | 0,07          |

Температура плавления графита  $t_{пл} \approx 3500^\circ\text{C}$ , температура кипения  $t_{кип} = 4200\text{—}5000^\circ\text{C}$  при давлении свыше  $100 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ .

Плотность графита при 20°C  $\rho = 1,55\text{—}2,23 \text{ г/см}^3$ ; определенная рентгенографически  $\rho = 2,27 \pm 0,01$ ; для естественных графитов  $\rho$  достигает 2,2; для прессованных 1,5 г/см³ и более.

Модуль сдвига 18000 МН/м²; коэффициент Пуассона  $\mu = 0,25$ ; твердость по Моосу для естественных пород 9 единиц, для искусственных 3—3,5. Предел прочности на сжатие 400 МН/м².

Теплопроводность графита после нейтронного облучения может уменьшиться в 50 раз. Например, после облучения при  $10^{14}$  нейтр/(см²·с) в течение 1000 ч теплопроводность графита при 30°C уменьшилась от 190 до 3,7 Вт/(м·°C).

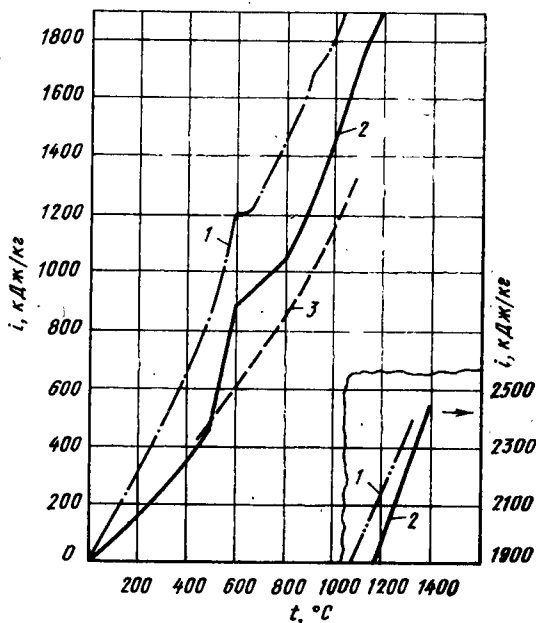


Рис. 35. Зависимость удельной энтальпии  $i$  керамических материалов от температуры: 1 — огнеупорная масса; 2 — шамот; 3 — кварц

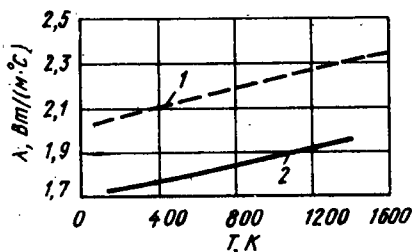


Рис. 36. Зависимость коэффициента теплопроводности  $\lambda$  двуокиси циркония (пористость 20%) от температуры: 1 — плавленная, кристаллическая; 2 — спеченная, пористая

Таблица VI-5

## Теплофизические свойства спеченных и плавленых оксидов некоторых материалов

| Материал                                        | Плотность, $\rho$ ,<br>г/см <sup>3</sup> | Пористость, %    | Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·°C) при температуре, °C |                |                |                |                |               |                |                    |              |                  | Темпе-<br>ратура<br>плавления,<br>°C | Коэффициент<br>расширения<br>$\beta \cdot 10^{-6}$ , 1/°C<br>(от 30 до<br>1000°C) |
|-------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------|------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|--------------------|--------------|------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
|                                                 |                                          |                  |                                                                        |                |                |                |                |               |                |                    |              |                  |                                      |                                                                                   |
|                                                 |                                          |                  | 100                                                                    | 200            | 400            | 600            | 800            | 1000          | 1200           | 1400               | 1600         | 1800             |                                      |                                                                                   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                  | 3,69—3,77                                | { 4,5—7,3<br>0 } | 28,90<br>30,4                                                          | 21,34<br>22,6  | 12,6<br>12,7   | 8,69<br>9,13   | 6,86<br>7,19   | 5,86<br>6,15  | 5,28<br>5,52   | 5,23<br>5,49       | 5,79<br>6,07 | (7,26)<br>(7,57) | 8,8<br>—                             |                                                                                   |
| CaO                                             | 3,03                                     | { 8,75<br>0 }    | 13,9<br>15,2                                                           | 10,14<br>11,11 | 8,4<br>9,16    | 7,57<br>8,286  | 7,28<br>7,99   | 7,12<br>7,78  | —<br>—         | —<br>—             | —<br>—       | —<br>—           | 9,7<br>—                             |                                                                                   |
| Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>                | 2,22                                     | { 31,1<br>0 }    | 3,681<br>5,379                                                         | 3,099<br>4,52  | 2,471<br>3,553 | 2,053<br>2,98  | 1,843<br>2,681 | 1,67<br>2,436 | 1,634<br>2,967 | (1,59)<br>(2,309)  | —<br>—       | —<br>—           | 10,2<br>—                            |                                                                                   |
| MgO                                             | 3,29—3,48                                | { 2,8—8,1<br>0 } | 34,4<br>35,9                                                           | 27,04<br>28,26 | 15,76<br>16,7  | 11,03<br>11,54 | 8,12<br>8,51   | 6,69<br>6,995 | 5,832<br>6,12  | 5,78<br>6,02       | 6,57<br>6,86 | 9,05<br>(9,49)   | 13,5<br>—                            |                                                                                   |
| Al <sub>6</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>13</sub> | 2,79                                     | { 11,04<br>0 }   | 5,39<br>6,12                                                           | 4,91<br>5,54   | 4,2<br>4,73    | 3,80<br>4,31   | 3,59<br>4,07   | 3,51<br>3,98  | 3,43<br>3,87   | (3,43)<br>(3,873)  | —<br>—       | —<br>—           | 5,3<br>—                             |                                                                                   |
| Al <sub>4</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>13</sub> | 2,21                                     | { 29,8<br>0 }    | (4,06)<br>(5,79)                                                       | 3,59<br>5,15   | 3,099<br>4,396 | 2,85<br>4,06   | 2,72<br>3,89   | 2,681<br>3,83 | 2,681<br>3,826 | (2,681)<br>(3,826) | —<br>—       | —<br>—           | 5,9<br>—                             |                                                                                   |
| MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                | 3,27                                     | { 7,65<br>0 }    | 13,8<br>14,95                                                          | 11,96<br>12,9  | 9,44<br>10,22  | 7,49<br>8,12   | 6,15<br>6,65   | 5,36<br>5,78  | 5,02<br>5,44   | —<br>—             | —<br>—       | —<br>—           | 7,6<br>—                             |                                                                                   |
| NiO                                             | 5,05                                     | { 25,7<br>0 }    | 9,21<br>12,39                                                          | 7,39<br>9,94   | 5,31<br>7,15   | 4,19<br>5,69   | 3,43<br>4,61   | 3,14<br>4,48  | —<br>—         | —<br>—             | —<br>—       | —<br>—           | 8,7<br>—                             |                                                                                   |

| Материал           | Плотность, $\rho$<br>г/см <sup>3</sup> | Пористость,<br>%                                              | Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·°С), при температуре, °С |                    |                |                |                |                |                |                    |                |                    | Темпера-<br>тура<br>плавле-<br>ния, °С | Коэффициент<br>линейного<br>расширения<br>$\beta \cdot 10^{-6}$ , 1/°С<br>(от 30 до<br>1000°С) |
|--------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                    |                                        |                                                               |                                                                         |                    |                |                |                |                |                |                    |                |                    |                                        |                                                                                                |
|                    |                                        |                                                               | 100                                                                     | 200                | 400            | 600            | 800            | 1000           | 1200           | 1400               | 1600           | 1800               |                                        |                                                                                                |
| BeO                | 2,7—2,86                               | $\left\{ \begin{array}{l} 4,67-9,93 \\ 0 \end{array} \right.$ | 209,3<br>219,8                                                          | 166,3<br>174,5     | 88,5<br>93,04  | 44,78<br>46,99 | 25,7<br>26,98  | 19,31<br>20,24 | 16,39<br>17,21 | 15,58<br>16,39     | 14,54<br>15,12 | (14,77)<br>(15,93) | —                                      | —                                                                                              |
| UO <sub>2</sub>    | 8,0<br>10,8                            | $\left\{ \begin{array}{l} 26,7 \\ 0 \end{array} \right.$      | (7,33)<br>(9,80)                                                        | 5,94<br>7,95       | 4,32<br>5,78   | 3,309<br>4,42  | 2,762<br>3,704 | 2,553<br>3,408 | —              | —                  | —              | —                  | 2175                                   | 6,1<br>—                                                                                       |
| TiO <sub>2</sub>   | 4,11                                   | $\left\{ \begin{array}{l} 3,5 \\ 0 \end{array} \right.$       | 6,28<br>6,53                                                            | 4,81<br>4,99       | 3,77<br>3,92   | 3,472<br>3,617 | 3,27<br>3,38   | 3,181<br>3,309 | 3,181<br>3,309 | —                  | —              | —                  | 1560                                   | 7,4<br>—                                                                                       |
| ThO <sub>2</sub>   | 8,07                                   | $\left\{ \begin{array}{l} 16,75 \\ 0 \end{array} \right.$     | 8,55<br>10,27                                                           | 7,02<br>8,55       | 4,98<br>5,99   | 3,64<br>4,355  | 2,85<br>3,408  | 2,553<br>3,059 | 2,09<br>2,512  | (2,053)<br>(2,454) | —              | —                  | 2800                                   | 9,2<br>—                                                                                       |
| ZnO                | 3,72                                   | $\left\{ \begin{array}{l} 34,0 \\ 0 \end{array} \right.$      | —                                                                       | (11,32)<br>(47,15) | 7,41<br>11,22  | 4,605<br>6,99  | 3,599<br>5,47  | —              | —              | —                  | —              | —                  | —                                      | —                                                                                              |
| ZrSiO <sub>4</sub> | 3,69                                   | $\left\{ \begin{array}{l} 18,6 \\ 0 \end{array} \right.$      | —                                                                       | 4,61<br>5,69       | 4,19<br>5,19   | 3,77<br>4,64   | 3,475<br>4,31  | 3,309<br>4,105 | 3,181<br>3,937 | 3,099<br>3,832     | —              | —                  | —                                      | —<br>4,2                                                                                       |
| ZrO <sub>2</sub>   | 5,22—5,35                              | $\left\{ \begin{array}{l} 12,3-14,4 \\ 0 \end{array} \right.$ | 1,65<br>1,95                                                            | 1,718<br>1,959     | 1,759<br>2,053 | 1,80<br>2,099  | 1,88<br>2,202  | 1,969<br>2,29  | 2,053<br>2,396 | 2,09<br>2,44       | —              | —                  | 2700<br>(2950)                         | 10,0<br>—                                                                                      |
| PbO <sub>2</sub>   | 10,4                                   | —                                                             | 4,19                                                                    | —                  | —              | —              | —              | —              | —              | —                  | —              | —                  | —                                      | —                                                                                              |

Примечания: 1. Величины в скобках получены экстраполированием. 2. Коэффициент теплопроводности спеченных окислов металлов также зависит от исходных порошков, степени прессования и режимов спекания. Для порошков двуокиси урана  $\rho = 3,6 \div 4,6$  г/см<sup>3</sup>;  $\lambda_{30} = 0,147$ ;  $\lambda_{100} = 0,142$ ;  $\lambda_{200} = 0,141$  Вт/(м·°С);  $c = 0,259$  кДж/(кг·°С).

Таблица VI-6

Истинные  $c$  и средние  $c_{cp}$ , кДж/(кг·°C), теплоемкости окислов — основных компонентов огнеупорных материалов и шлаков в зависимости от температуры

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\text{SiO}_2$ |          | $\text{Al}_2\text{O}_3$ |          | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ |          | $\text{FeO}$ |          | $\text{MgO}$ |          | $\text{MnO}$ |          | $\text{CaO}$ |          |
|---------------------|----------------|----------|-------------------------|----------|-------------------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|
|                     | $c$            | $c_{cp}$ | $c$                     | $c_{cp}$ | $c$                     | $c_{cp}$ | $c$          | $c_{cp}$ | $c$          | $c_{cp}$ | $c$          | $c_{cp}$ | $c$          | $c_{cp}$ |
| 0                   | 0,669          | 0,669    | 0,720                   | 0,720    | 0,615                   | 0,615    | 0,699        | 0,699    | 0,817        | 0,871    | 0,762        | 0,762    | 0,737        | 0,737    |
| 100                 | 0,795          | 0,783    | 0,925                   | 0,837    | 0,724                   | 0,674    | 0,737        | 0,720    | 1,017        | 0,955    | 0,825        | 0,787    | 0,821        | 0,783    |
| 200                 | 0,963          | 0,849    | 1,026                   | 0,909    | 0,799                   | 0,720    | 0,758        | 0,733    | 1,089        | 1,005    | 0,879        | 0,812    | 0,858        | 0,812    |
| 300                 | 1,026          | 0,900    | 1,089                   | 0,959    | 0,854                   | 0,754    | 0,766        | 0,745    | 1,135        | 1,043    | 0,929        | 0,833    | 0,883        | 0,833    |
| 400                 | 1,068          | 0,938    | 1,130                   | 0,996    | 0,904                   | 0,787    | 0,783        | 0,754    | 1,164        | 1,068    | 0,976        | 0,858    | 0,896        | 0,846    |
| 500                 | 1,105          | 0,967    | 1,164                   | 1,026    | 0,955                   | 0,816    | 0,795        | 0,758    | 1,189        | 1,089    | 1,013        | 0,879    | 0,909        | 0,858    |
| 600                 | 1,135          | 0,992    | 1,193                   | 1,051    | 1,000                   | 0,842    | 0,808        | 0,766    | 1,206        | 1,109    | 1,047        | 0,900    | 0,921        | 0,867    |
| 700                 | 1,159          | 1,013    | 1,218                   | 1,076    | 1,047                   | 0,867    | 0,816        | 0,775    | 1,227        | 1,122    | 1,076        | 0,917    | 0,929        | 0,875    |
| 800                 | 1,189          | 1,034    | 1,239                   | 1,093    | 1,093                   | 0,892    | 0,825        | 0,779    | 1,243        | 1,139    | 1,097        | 0,934    | 0,938        | 0,883    |
| 900                 | 1,209          | 1,051    | 1,260                   | 1,109    | —                       | —        | 0,837        | 0,783    | 1,256        | 1,151    | 1,114        | 0,946    | 0,946        | 0,892    |
| 1000                | 1,235          | 1,072    | 1,281                   | 1,126    | —                       | —        | —            | —        | 1,273        | 1,159    | 1,126        | 0,959    | 0,950        | 0,896    |
| 1100                | 1,256          | 1,084    | 1,302                   | 1,143    | —                       | —        | —            | —        | 1,285        | 1,172    | —            | —        | 0,959        | 0,900    |
| 1200                | 1,281          | 1,101    | 1,323                   | 1,156    | —                       | —        | —            | —        | 1,302        | 1,181    | —            | —        | 0,963        | 0,909    |
| 1300                | 1,302          | 1,114    | 1,339                   | 1,168    | —                       | —        | —            | —        | 1,315        | 1,193    | —            | —        | 0,971        | 0,913    |
| 1400                | 1,323          | 1,130    | 1,361                   | 1,181    | —                       | —        | —            | —        | 1,327        | 1,202    | —            | —        | 0,979        | 0,917    |
| 1500                | 1,344          | 1,143    | 1,378                   | 1,193    | —                       | —        | —            | —        | 1,339        | 1,209    | —            | —        | 0,984        | 0,921    |

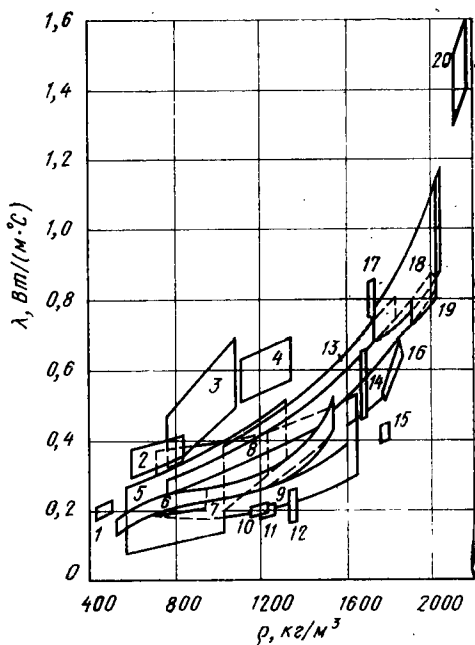


Рис. 37. Зависимость коэффициента теплопроводности  $\lambda$  от плотности  $\rho$ , по опытным данным для некоторых строительных материалов:  
 1 — асботермит; 2 — асбозурит; 3 — аэродоломит;  
 4 — известняк параллельно слоям; 5 — трепельный кирпич; 6 — теплый раствор; 7 — глино-торфяной кирпич; 8 — глиногилс; 9 — теплый бетон; 10 — алебастровый кирпич; 11 — асбестовая штукатурка; 12 — кирпич из обожженной глины; 13 — ракушечник; 14 — чистая глина; 15 — болотная руда; 16 — красный кирпич; 17 — силикатный кирпич; 18 — известняк; 19 — кислотоупорный кирпич; 20 — песчаник

Таблица VI-7

Средние значения теплоемкости  $c_{\text{ср}}$  огнеупорных и нерудных материалов

| Материал                      | Температура, °C | $c_{\text{ср}}$<br>Дж | Материал            | Температура, °C | $c_{\text{ср}}$<br>Дж |
|-------------------------------|-----------------|-----------------------|---------------------|-----------------|-----------------------|
|                               |                 | (кг·°C)               |                     |                 | (кг·°C)               |
| Базальт                       | 17—100          | 0,858                 | Мусковит            | 20—98           | 0,842                 |
|                               | 20—767          | 1,089                 | Опал                | 12—100          | 0,992                 |
|                               | 750—880         | 2,621                 | Ортоклаз            | 15—99           | 0,787                 |
| Гипс                          | 17—100          | 1,072                 | Песчаник            | 15—100          | 0,729                 |
| Гранит                        | 0—100           | 0,795                 | Тальк               | 200—205         | 1,256                 |
| Графит                        | 0—18            | 0,561                 | Углеродистый кирпич | 24—68           | 0,854                 |
|                               | 100             | 0,837                 |                     | 700             | 0,862                 |
|                               | 0—2000          | 1,989                 |                     | 800             | 0,883                 |
| Диатомовая земля              | 17—100          | 0,888                 | Хромистый железняк  | 900             | 0,896                 |
| Доломит                       | 17—100          | 0,804                 |                     | 1000            | 0,909                 |
| Известняк                     | 0—100           | 0,904                 |                     | 1200            | 0,929                 |
| Кальцит                       | 17              | 0,791                 | Хромитовый кирпич   | 1400            | 0,946                 |
|                               | 17—100          | 0,837                 | Окись хрома         | —               | 0,833                 |
| Карборунд                     | 0               | 0,586                 | Циркон              | 21—52           | 0,754                 |
|                               | 300             | 1,093                 | Цирконовый кирпич   | 15—100          | 0,611                 |
|                               | 600             | 1,151                 |                     | 25—600          | 0,574                 |
| Кварцевое стекло              | 15—100          | 0,779                 |                     | 25—1000         | 0,657                 |
| Корунд (зернистый)            | 0,98            | 0,829                 |                     | 25—1200         | 0,699                 |
|                               | 20—2030         | 1,168                 |                     | 25—1400         | 0,733                 |
| Магнезит (порода)             | —               | 0,950                 | Окись циркония      | 0—100           | 0,452                 |
| Магнезит спекшийся (кусковой) | —               | 0,979                 | Шпинель благородная | 15—47           | 0,812                 |
| Мрамор                        | 0—100           | 0,904                 |                     |                 |                       |

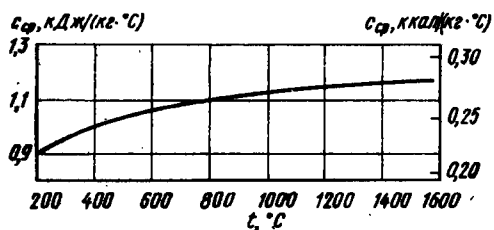
Рис. 38. Зависимость от температуры средней теплоемкости  $c_{\text{ср}}$  для  $\text{Al}_2\text{O}_3$

Рис. 39. Зависимость теплоемкости с шлаков углей (1) и сланцев (2) от температуры  $t$

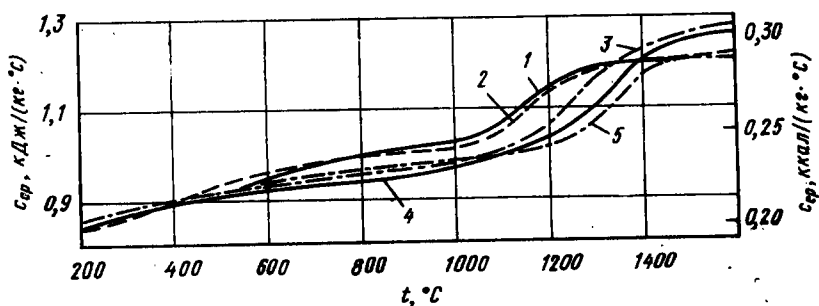
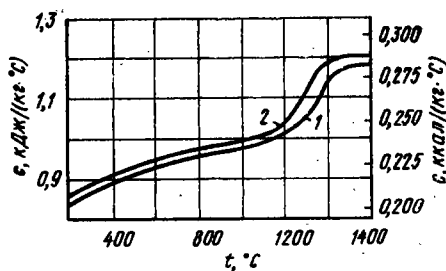


Рис. 40. Зависимость средней теплоемкости  $c_{\text{сп}}$  шлаков с большим содержанием CaO от температуры  $t$ :

1 — сланец каширский; 2 — сланец савельевский; 3 — доменный шлак (39% CaO); 4 — доменный шлак (50% CaO); 5 — сланец эстонский

Химический состав шлаков на различных сланцах

| Сланцы       | Химический состав шлаков, % |                                |                                |     |      |      |                 |
|--------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----|------|------|-----------------|
|              | SiO <sub>2</sub>            | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO | CaO  | MgO  | SO <sub>3</sub> |
| Савельевский | 45,7                        | 11,6                           | 11,6                           | —   | 18,9 | 2,00 | 10,0            |
| Каширский    | 35,5                        | 8,4                            | 10,8                           | —   | 28,6 | 1,0  | 15,6            |
| Эстонский    | 31,3                        | 8,5                            | 6,4                            | —   | 41,3 | 5,1  | 6,1             |

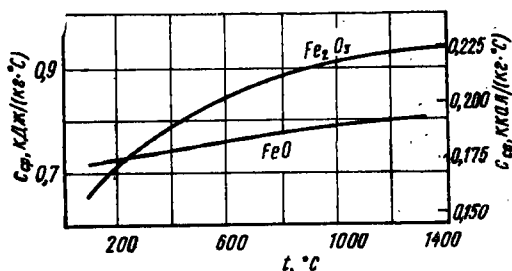


Рис. 41. Зависимость средней теплоемкости  $c_{\text{сп}}$  для FeO и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> от температуры  $t$

## КЛАССИФИКАЦИЯ ОГНЕУПОРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Для всех видов огнеупорных изделий по ГОСТ 4385—68, за исключением легковесных (теплоизоляционных), устанавливают основные признаки их классификации (технической). Огнеупорные изделия подразделяют на следующие типы и группы.

А. В зависимости от химико-минералогического состава:  
Таблица VI-8

Химико-минералогический состав огнеупорных изделий

| Огнеупоры                                                           | Определяющий химический компонент (на прокаленное вещество) |               |
|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------|
|                                                                     | обозначение                                                 | содержание, % |
| <b>Кремнеземистые:</b>                                              |                                                             |               |
| кварцевое стекло . . . . .                                          | SiO <sub>2</sub>                                            | >99           |
| динасовые (тридимитокристаллитовые) на известковой связке . . . . . | SiO <sub>2</sub>                                            | >93           |
| то же, на различных связках и с разными добавками . . . . .         | SiO <sub>2</sub>                                            | >80           |
| <b>Алюмосиликатные (низко-, средне- и высокоглиноземистые):</b>     |                                                             |               |
| полукислые . . . . .                                                | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                              | >28           |
| шамотные . . . . .                                                  | SiO <sub>2</sub>                                            | 65—85         |
| муллитокремнеземистые . . . . .                                     | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                              | 28—45         |
| муллитовые . . . . .                                                | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                              | 45—62         |
| муллитокорундовые . . . . .                                         | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                              | 62—72         |
| корундовые . . . . .                                                | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                              | 72—90         |
|                                                                     | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                              | >90           |
| <b>Магнезиальные:</b>                                               |                                                             |               |
| магнезитовые (периклазовые) . . . . .                               | MgO                                                         | >90           |
| то же, на различных связках . . . . .                               | MgO                                                         | >80           |
| <b>Магнезиально-известковые:</b>                                    |                                                             |               |
| магнезитодоломитовые (периклазоизвестковые) . . . . .               | MgO                                                         | >50           |
|                                                                     | CaO                                                         | >10           |
| доломитовые (известковопериклазовые) . . . . .                      | MgO                                                         | 35—50         |
|                                                                     | CaO                                                         | 45—70         |
| то же, стабилизированные (периклазоалитовые) . . . . .              | MgO                                                         | 35—65         |
|                                                                     | SiO <sub>2</sub>                                            | 6—15          |
|                                                                     | CaO                                                         | 15—40         |
|                                                                     | CaO : SiO <sub>2</sub>                                      | 2,7—2,9       |
| известковые . . . . .                                               | CaO                                                         | >70           |
| <b>Магнезиально-шпинелидные:</b>                                    |                                                             |               |
| магнезитохромитовые (периклазохромитовые) . . . . .                 | MgO                                                         | >60           |
|                                                                     | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                              | 5—18          |
| хромомagneзитовые (хромитопериклазовые) . . . . .                   | MgO                                                         | 40—60         |
|                                                                     | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                              | 15—30         |
| хромитовые . . . . .                                                | MgO                                                         | <40           |
|                                                                     | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                              | >25           |
| периклазошпинельные . . . . .                                       | MgO                                                         | 40—80         |
|                                                                     | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                              | 15—55         |
| шпинельные . . . . .                                                | MgO                                                         | 25—40         |
|                                                                     | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                              | 55—70         |
| <b>Магнезиально-силикатные:</b>                                     |                                                             |               |
| периклазофорстеритовые . . . . .                                    | MgO                                                         | 65—80         |
|                                                                     | SiO <sub>2</sub>                                            | >10           |
| форстеритовые . . . . .                                             | MgO                                                         | 50—65         |
|                                                                     | SiO <sub>2</sub>                                            | 25—35         |
| форстеритохромитовые . . . . .                                      | MgO                                                         | 45—60         |
|                                                                     | SiO <sub>2</sub>                                            | 20—30         |
|                                                                     | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                              | 5—15          |
| <b>Углеродистые:</b>                                                |                                                             |               |
| углеродистые графитированные . . . . .                              | C                                                           | >98           |
| углеродистые неграфитированные . . . . .                            | C                                                           | >85           |
| углеродсодержащие . . . . .                                         | C                                                           | 5—70          |

| Огнеупоры                                                                                                                                              | Определяющий химический компонент (на прокаленное вещество)            |                                                         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                        | обозначение                                                            | содержание, %                                           |
| Карбидкремниевые:<br>карбидкремниевые рекристаллизованные<br>карбидкремниевые на различных связках<br>карбидкремнийсодержащие . . . . .                | SiC<br>SiC<br>SiC                                                      | $\geq 90$<br>$\geq 70$<br>20—70                         |
| Цирконистые:<br>циркониевые (бадделеитовые) . . . . .<br>бадделеитокорундовые . . . . .                                                                | ZrO <sub>2</sub><br>ZrO <sub>2</sub><br>Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | $\geq 90$<br>$\geq 30$<br>$\leq 65$                     |
| цирконовые на различных связках с различными добавками . . . . .                                                                                       | ZrO <sub>2</sub><br>SiO <sub>2</sub>                                   | $\geq 35$<br>$\geq 18$                                  |
| Окисные:<br>изделия из окислов (BeO, MgO, CaO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ZrO <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub> , UO <sub>2</sub> и др.) . . . . . | —                                                                      | Максимально высокое содержание определяющего окисла     |
| Некислородные:<br>изделия из нитридов, боридов, карбидов (кроме SiC), силицидов и других некислородных соединений . . . . .                            | —                                                                      | Максимально высокое содержание некислородных соединений |

### Б. По степени огнеупорности:

- а) огнеупорные: 1580—1770°C (в пироскопах керамических ПК 158—ПК 177);  
 б) высокоогнеупорные: от 1771 до 2000°C (ПК 177—ПК 200);  
 в) высшей огнеупорности:  $>2000^\circ\text{C}$  (свыше ПК 200).

### В. В зависимости от пористости:

- с открытой пористостью:  
 особоплотные,  $\leq 3\%$ ;  
 высокоплотные, 3—10%;  
 плотные, 10—16%;  
 уплотненные, 16—20%;  
 обычные, I подгруппы, 20—24%; II подгруппы, 24—30%;  
 с общей пористостью:  
 легковесные с общей пористостью, 45—85%;  
 ультралегковесные,  $\geq 85\%$ .

### Г. По способу изготовления:

1) изделия пластичноформованные, изготовленные из масс в пластичном состоянии методом машинной формовки или прессованием на механических или других прессах и различными методами ручного формования;

2) сухоформованные неармированные и армированные, изготовленные из полусухих или сухих порошкообразных малопластичных или непластичных масс (в том числе из бетонов, плавящихся материалов и

т. п.) методами механического, гидравлического или гидростатического прессования, вибропрессования, вибрирования, трамбования и т. п.;

3) шликернолитые, изготовленные литьем из жидкого шликера, пеношликера, газошликера, термопластичного шликера и т. п.;

4) термопластичнопрессованные, изготовленные методом прессования из масс с применением термопластичных добавок (парафина, воска и др.);

5) горячепрессованные, изготовленные горячим прессованием из нагретых до термопластичного состояния огнеупорных масс;

6) изделия плавленолитые, изготовленные литьем из расплава (электроплавкой, термитной плавкой и т. п.);

7) изготовленные методом механической обработки (резанием, шлифованием и др.) из естественных горных пород или плавленых блоков.

#### Д. В зависимости от термической обработки:

1) обожженные;

2) безобжиговые (включая армированные), подвергнутые сушке, а в ряде случаев нагреву до 250—400°C;

3) горячепрессованные, подвергнутые отжигу после прессования;

4) плавленолитые, подвергнутые отжигу после отливки.

#### Е. По форме и размерам:

1) нормальный кирпич (большого и малого формата), «прямой» и «клиновой» (продольный и поперечный);

2) фасонные (простые, сложные, особо сложные);

3) фасонные крупноблочные изделия массой свыше 60 кг (простые, сложные, особо сложные);

4) специальные изделия промышленного и лабораторного назначения (тигли, трубки и т. п.).

### МАРКИРОВКА ОГНЕУПОРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

На огнеупорных изделиях в соответствии с ГОСТ 1502—42 и 4873—71 наносят следующие условные обозначения:

а) завода-изготовителя;

б) марки изделий в соответствии с назначением изделий (на изделиях нормальных размеров и формы марки не обозначаются).

Для следующих огнеупоров введено также обозначение рода или вида изделий:

Полукислые:

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| на каолиновой связке . . . . .           | ПК |
| на глинистой связке . . . . .            | ПГ |
| на связке из каолина или глины . . . . . |    |
| рядовых свойств . . . . .                | ПР |
| Андалузитовые . . . . .                  | АД |
| Шамотно-андалузитовые . . . . .          | ША |
| Хромо-магнезитовые . . . . .             | ХМ |
| Талько-магнезитовые . . . . .            | ТМ |
| Хромитовые . . . . .                     | Х  |
| Карборундовые . . . . .                  | К  |
| Шамотные . . . . .                       | Ш  |
| Шамотные легковесные . . . . .           | ШЛ |
| Полукислые . . . . .                     | П  |
| Динасовые . . . . .                      | Дн |

Огнеупорные изделия, выпускаемые без обжига (безобжиговые), после обозначения марки должны иметь дополнительно знак «БО».

# СВОЙСТВА ОГНЕУПОРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Таблица VI-9

Химический состав некоторых огнеупорных изделий, %

| Изделия                                         | SiO <sub>2</sub> | TiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>(FeO) | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO     | MgO     | Щелочи  | ZrO <sub>2</sub> | C     | SiC   | Примеси<br>других<br>окислов |
|-------------------------------------------------|------------------|------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------|---------|---------|---------|------------------|-------|-------|------------------------------|
| Динасовые . . . . .                             | 95—96            | Следы            | 1—2                            | 0,5—1,0                                 | —                              | 1,3—2,5 | ≤0,1    | ≤0,8    | —                | —     | —     | —                            |
| Карбундовые . . . . .                           | 4—30             | —                | 0,2—20                         | 0,5—2                                   | —                              | 0,5—2   | 0,5     | Следы   | —                | —     | 93—50 | —                            |
| Алюмосиликатные (бок-<br>ситовые и диаспоровые) | 14—42            | 2—4              | 80—50                          | 1—5                                     | —                              | ≤1,5    | —       | ≤3      | —                | —     | —     | —                            |
| Шамотные . . . . .                              | 48—65            | 1—3              | 46—30                          | 0,5—3,5                                 | —                              | 0,2—1,5 | 0,2—1,0 | 0,1—3,5 | —                | —     | —     | —                            |
| Магнезитовые . . . . .                          | 0,5—3,5          | —                | 0,5—2,0                        | 0,2—8,0                                 | —                              | 0,2—8,0 | 95—86   | 0,5—3   | —                | —     | —     | —                            |
| Форстеритовые (оливи-<br>новые) . . . . .       | 30—40            | До 0,5           | 1,2—2,1                        | 7—9                                     | До 0,7                         | ≤0,7    | 60—50   | Следы   | —                | —     | —     | —                            |
| Хромитовые . . . . .                            | 4—9              | —                | 8—18                           | 10—20                                   | 30—58                          | ≤0,5    | 23—18   | —       | —                | —     | —     | —                            |
| Хромомагнезитовые . . . . .                     | 4—8              | —                | 8—13                           | 8—13                                    | 20—35                          | 0,5—2,5 | 52—30   | —       | —                | —     | —     | —                            |
| Графитовые . . . . .                            | 13—45            | —                | 6—30                           | ≤1,5                                    | —                              | Следы   | Следы   | —       | —                | 80—25 | —     | —                            |
| Коксовые . . . . .                              | —                | —                | —                              | —                                       | —                              | —       | —       | —       | —                | 95—90 | —     | 10—5                         |
| Цирконовые . . . . .                            | 0,5—15           | ≤1,5             | ≤3                             | ≤5                                      | —                              | —       | —       | —       | 98—80            | —     | —     | —                            |
| Циркониевые . . . . .                           | 30—35            | —                | ≤3                             | ≤3                                      | —                              | ≤3      | ≤1      | —       | 55—66            | —     | —     | —                            |
| Корундовые . . . . .                            | 0,5—45,0         | ≤3               | 99—50                          | 0,5—4                                   | —                              | —       | —       | —       | —                | —     | —     | —                            |
| Плавленые муллитовые . . . . .                  | 16—20            | ≤5               | 73—70                          | 0,3—2,0                                 | —                              | ≤2,0    | —       | ≤2,0    | —                | —     | —     | —                            |
| Силлиманитовые . . . . .                        | 30—46            | ≤1,5             | 66—50                          | ≤2,5                                    | —                              | ≤0,5    | ≤0,5    | ≤2      | —                | —     | —     | —                            |

Таблица VI-10

## Теплофизические свойства огнеупорных изделий и материалов

| Наименование огнеупора                          | Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup> |           | Теплоемкость, с. кДж/(кг·°C)<br>$\times 10^3$ | Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·°C)     | Удельное электропротравление<br>$\rho_z$ , Ом·см, при температуре, °C |             |               |
|-------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------|---------------|
|                                                 | с порами                             | без пор   |                                               |                                                        | 800                                                                   | 1200        | 1600          |
| Графитовые изделия . . . . .                    | 1,6                                  | 2,2       | 0,837                                         | $162,8 - 40,7 \cdot 10^{-3} t_{cp}$                    | —                                                                     | —           | —             |
| Диасовый кирпич . . . . .                       | 1,9—1,93                             | 2,38—2,5  | $0,837 + 0,25 \cdot 10^{-3} t_{cp}$           | $0,93 + 0,69 \cdot 10^{-3} t_{cp}$                     | 200                                                                   | 9,14        | 1,5           |
| Карборундовые изделия (карбофракс) . . . . .    | 2,3—2,6                              | 3,1—3,2   | $0,96 + 0,147 \cdot 10^{-3} t_{cp}$           | $20,9 - 10,5 \cdot 10^{-3} t_{cp}$                     | 800                                                                   | 40          | 0—0,8         |
| Корундовые (алундовые) изделия . . . . .        | 2,6—2,9                              | 3,7—3,9   | $0,79 + 0,42 \cdot 10^{-3} t_{cp}$            | $2,1 + 1,9 \cdot 10^{-3} t_{cp}$                       | 1000                                                                  | 100         | 5,2—4,0       |
| Рекристаллизованный корунд . . . . .            | 3,75—3,85                            | 3,8—3,9   | —                                             | $29,1^{*2}, 5,8^{*2}$                                  | —                                                                     | —           | —             |
| Магнезитовый кирпич . . . . .                   | 2,6—2,8                              | 3,0—3,2   | $1,05 + 0,29 \cdot 10^{-3} t_{cp}$            | $4,7 - 1,7 \cdot 10^{-3} t_{cp}$                       | 1000                                                                  | 100—200     | —             |
| Изделия из плавного муллита . . . . .           | 2,1—2,4                              | 3,0—3,3   | $1,05 + 0,25 \cdot 10^{-3} t_{cp}$            | —                                                      | —                                                                     | —           | —             |
| Плавный магнезитовый кирпич . . . . .           | 2,7—2,8                              | 3,5—3,6   | —                                             | —                                                      | 4000                                                                  | 100—200     | 1,0—2,0       |
| Окись бериллия . . . . .                        | —                                    | 3,0       | $0,13 + 0,52 \cdot 10^{-3} t_{cp}$            | $1,9 - 3,7^{*3}$                                       | —                                                                     | $10^9$      | —             |
| Окись тория . . . . .                           | —                                    | 10,0      | $0,25^{*1}$                                   | Очень низкий                                           | —                                                                     | $10^7$      | —             |
| Полукислый огнеупорный кирпич . . . . .         | 1,85—1,95                            | 2,5—2,6   | $-0,88 + 0,23 \cdot 10^{-3} t_{cp}$           | $0,87 + 0,52 \cdot 10^{-3} t_{cp}$                     | —                                                                     | 4—6         | —             |
| Строительный (красный) кирпич . . . . .         | 1,4—1,6                              | 2,5—2,6   | 0,92                                          | $0,81 + 0,47 \cdot 10^{-3} t_{cp}$                     | —                                                                     | —           | —             |
| Силлиманитовые и муллитовые изделия . . . . .   | 2,2—2,4                              | 2,8—3,0   | $0,84 + 0,25 \cdot 10^{-3} t_{cp}$            | $1,69 - 0,23 \cdot 10^{-3} t_{cp}$                     | 180                                                                   | 11,5        | 3,5           |
| Угльные изделия . . . . .                       | 1,35—1,5                             | 1,8—2,1   | 0,837                                         | $23,3 \pm 34,9 \cdot 10^{-3} t_{cp}^{*4}$<br>До 1000°C | —                                                                     | —           | —             |
| Хромитовый кирпич . . . . .                     | 3,0—3,2                              | 3,8—4,2   | $0,84 + 0,29 \cdot 10^{-3} t_{cp}$            | $1,28 + 0,41 \cdot 10^{-3} t_{cp}$                     | 3,0                                                                   | $0,5 - 0,1$ | $0,05 - 0,01$ |
| Хромомagneзитовый кирпич . . . . .              | 2,8—2,9                              | 3,7—3,8   | —                                             | $1,9 - 2,1^{*5}$                                       | —                                                                     | —           | —             |
| Термостойкий хромомagneзитовый кирпич . . . . . | 2,75—2,85                            | 3,6—3,8   | —                                             | $4,1 - 1,11 \cdot 10^{-3} t_{cp}$                      | —                                                                     | —           | —             |
| Циркониевые изделия . . . . .                   | 3,3                                  | 4,5—5,0   | $0,54 + 0,13 \cdot 10^{-3} t_{cp}$            | $1,3 - 0,64 \cdot 10^{-3} t_{cp}$                      | 1000—10000                                                            | 10,0        | —             |
| Цирконовые изделия . . . . .                    | 3,2—3,3                              | 4,0—4,5   | $0,63 + 0,13 \cdot 10^{-3} t_{cp}$            | —                                                      | —                                                                     | 10,0        | —             |
| Шамотный кирпич . . . . .                       | 1,8—1,9                              | 2,54—2,62 | $0,88 + 0,23 \cdot 10^{-3} t_{cp}$            | $0,84 + 0,58 \cdot 10^{-3} t_{cp}$                     | 7—15                                                                  | $1,0 - 1,5$ | 0,6           |

\*<sup>1</sup> При 25°C. \*<sup>2</sup> При 100°C. \*<sup>3</sup> При 20°C. \*<sup>4</sup> До 1000°C. \*<sup>5</sup> От 0 до 70°C.

Таблица VI-11

## Основные свойства некоторых огнеупоров

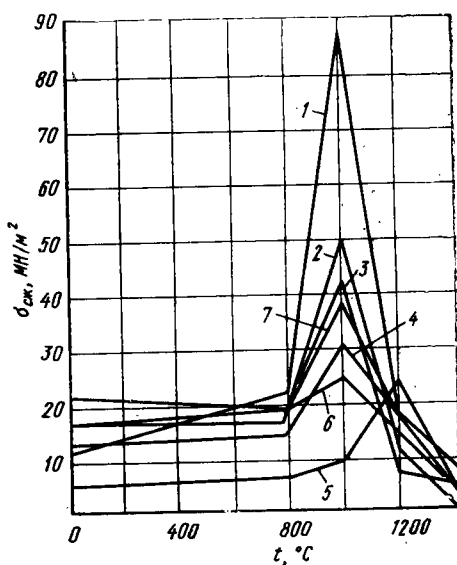
| Изделия                   | Плотность, г/см <sup>3</sup> |                      | Огнеупорность, °С | Допустимая температура, °С | Предел прочности при сжатии, МН/м <sup>2</sup> , до | Температура начала деформации под нагрузкой 0,196 МН/м <sup>2</sup> , °С |
|---------------------------|------------------------------|----------------------|-------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
|                           | с учетом пористости          | без учета пористости |                   |                            |                                                     |                                                                          |
| Бокситовые . . .          | 2,0—2,35                     | —                    | 1780—1950         | —                          | 39,2—68,6                                           | 1500—1600                                                                |
| Графитовые . . .          | 1,6                          | 2,2                  | 2000              | 2000                       | 19,6—29,4                                           | 1900                                                                     |
| Коксовые . . .            | 1,35—1,6                     | —                    | 2500              | —                          | 14,7—34,3                                           | 1900                                                                     |
| Талько-магнезитовые . . . | —                            | 2,85                 | 1540—1560         | —                          | 29,4—39,2                                           | 1500                                                                     |
| Форстеритовые . . .       | 2,3—2,5                      | —                    | 1860—1920         | —                          | 9,8—24,5                                            | 1550—1570                                                                |
| Хромитовые . . .          | 2,8—3,3                      | —                    | 1850—2050         | 1650—1700                  | 24,5—49,0                                           | 1300—1500                                                                |
| Циркониевые . . .         | —                            | —                    | 2500              | 2000                       | 98—196                                              | 1550—1600                                                                |
| Цирконовые . . .          | 2,1—2,2                      | —                    | 2000—2500         | 1900                       | 14,7—39,2                                           | 1550—1650                                                                |
| Из окиси бериллия . . .   | —                            | —                    | 2600              | 2000                       | —                                                   | —                                                                        |
| Из окиси тория . . .      | —                            | —                    | 3000—3100         | 2500                       | —                                                   | —                                                                        |

Таблица VI-12

## Физические свойства шамотного (ГОСТ 390—69) и полукислого (ГОСТ 4873—71) кирпича

| кирпича      |                   |                                    |              |                          |                                    |                |                                                |
|--------------|-------------------|------------------------------------|--------------|--------------------------|------------------------------------|----------------|------------------------------------------------|
| Класс        | Огнеупорность, °С | Предел прочности при сжатии, МН/м² |              | Дополнительная усадка, % | Открытая пористость (кажущаяся), % |                | Допустимая максимальная температура кладки, °С |
|              |                   | I подгруппа                        | II подгруппа |                          | I подгруппа                        | II подгруппа   |                                                |
| ГОСТ 390—69  |                   |                                    |              |                          |                                    |                |                                                |
| ША           | ≥1730             | ≥19,6                              | ≥14,7        | ≤0,7*1                   | ≤24                                | ≤30            | 1300—1400                                      |
| ШБ           | ≥1670             | ≥19,6                              | ≥12,7        | ≤0,7*2                   | ≤24                                | ≤30            | 1250—1300                                      |
| ШВ           | ≥1580             | —                                  | ≥12,2        | ≤0,7*3                   | —                                  | —              | 1200—1250                                      |
| ШУС          | ≥1580             | —                                  | ≥12,2        | ≤0,7*3                   | —                                  | Не нормируется | —                                              |
| ГОСТ 4873—71 |                   |                                    |              |                          |                                    |                |                                                |
| ПА           | ≥1710             | —                                  | ≥12,2        | ≤0,5*1                   | —                                  | —              | —                                              |
| ПБ           | ≥1670             | —                                  | ≥14,7        | ≤0,5*2                   | ≤24                                | ≤30            | —                                              |
| ПВ           | ≥1580             | —                                  | ≥9,8         | ≤0,8*3                   | —                                  | Не нормируется | —                                              |

\*1 При 1400°С. \*2 При 1350°С. \*3 При 1250°С.

Рис. 42. Зависимость механической прочности  $\sigma_{сж}$  шамотных огнеупоров от температуры при различном содержании  $Al_2O_3$ , %:  
1 — 23,7; 2 — 31,6; 3 — 26,3; 4 — 37,2; 5 — 43,0;  
6 — 42,4; 7 — 16,4

## Физико-химические свойства динаса различного назначения

| Показатели                                                                                                   | Динас<br>для<br>коксовых<br>печей | Динас для мартеновских печей |                |                     |                                                          | Динас<br>для<br>электро-<br>сталепла-<br>вильных<br>печей<br>(электро-<br>динас) |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|----------------|---------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                              |                                   | особого<br>назначе-<br>ния   | класс          |                     | высококремне-<br>земистый<br>высокоплотный<br>для сводов |                                                                                  |
|                                                                                                              |                                   |                              | I              | II                  |                                                          |                                                                                  |
| Содержание SiO <sub>2</sub> , %                                                                              | >94                               | >94,5                        | >94,5          | >93,0               | >97                                                      | >96                                                                              |
| Содержание Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %                                                                | Не<br>нормиру-<br>ется            | ≤1,5                         | ≤1,5           | Не норми-<br>руется | —                                                        | ≤1,5                                                                             |
| Содержание CaO, %                                                                                            | То же                             | ≤2,8                         | Не нормируется |                     |                                                          | ≤1,7                                                                             |
| Огнеупорность, °C                                                                                            | >1700                             | >1710                        | >1710          | >1690               | Не нормиру-<br>ется                                      | >1720                                                                            |
| Температура начала де-<br>формации под нагрузкой<br>0,196 МН/м <sup>2</sup> (2 кгс/см <sup>2</sup> ), °C     | >1650                             | >1660                        | >1650          | >1620               | То же                                                    | >1660                                                                            |
| Плотность, г/см <sup>3</sup> (без<br>учета пористости)                                                       | ≤2,37                             | ≤2,36                        | ≤2,38          | ≤2,4*1              | ≤2,38                                                    | ≤2,34                                                                            |
| Дополнительный рост<br>при температуре 1450°C,<br>%                                                          | ≤0,4                              | —                            | —              | —                   | —                                                        | —                                                                                |
| Пористость кажущаяся,<br>%:                                                                                  | —                                 | 23                           | 23             | 25                  | 14                                                       | 22*3                                                                             |
| для подового кирпича                                                                                         | ≤16                               | —                            | —              | —                   | —                                                        | —                                                                                |
| для головочного и<br>стенowego кирпича                                                                       | ≤23                               | —                            | —              | —                   | —                                                        | —                                                                                |
| для прочего кирпича                                                                                          | Не<br>нормиру-<br>ется            | —                            | —              | —                   | —                                                        | —                                                                                |
| Предел прочности при<br>сжатии, МН/м <sup>2</sup> :                                                          | —                                 | ≥22,0                        | ≥19,6          | ≥17,1               | ≥49,0                                                    | ≥24,5                                                                            |
| для подового кирпича                                                                                         | 49,0                              | —                            | —              | 14,7*2              | 44,0*2                                                   | 19,6*2                                                                           |
| для головочного и<br>стенowego кирпича зон<br>вертикалов и пере-<br>крытия вертикалов,<br>истираемого коксом | 29,4                              | —                            | —              | —                   | —                                                        | —                                                                                |
| для остального кир-<br>пича                                                                                  | 19,6                              | —                            | —              | —                   | —                                                        | —                                                                                |

\*1 Для одного из трех образцов допускается 2,42. \*2 Для одного из трех образцов допускается не менее указанного. \*3 Для отдельных образцов не более 24.

Таблица VI-14

## Свойства алюмосиликатных огнеупоров различных заводов

| Показатели                                                                 | Шамотный<br>доменный<br>1 класса<br>(семилюкский) | Каолиновый<br>ковшевой<br>(часов-ярский) | Высокоглино-<br>земистый<br>с содержанием<br>$Al_2O_3$<br>60% (семилюк-<br>ский) |
|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Химический состав, %:                                                      |                                                   |                                          |                                                                                  |
| $Al_2O_3$ . . . . .                                                        | 39,01                                             | 39,55                                    | 66,77                                                                            |
| $TiO_2$ . . . . .                                                          | 1,89                                              | 1,49                                     | —                                                                                |
| $Fe_2O_3$ . . . . .                                                        | 1,23                                              | —                                        | 0,9                                                                              |
| $SiO_2$ . . . . .                                                          | 55,53                                             | —                                        | —                                                                                |
| Огнеупорность, °C . . . . .                                                | 1720                                              | 1750                                     | >1800                                                                            |
| Плотность (без учета пористости), г/см <sup>3</sup> . . . . .              | 2,665                                             | 2,676                                    | 3,026                                                                            |
| Плотность (с учетом пористости), г/см <sup>3</sup> . . . . .               | 2,163                                             | 2,18                                     | 2,42                                                                             |
| Пористость кажущаяся, % . . . . .                                          | 16,2                                              | 16,4                                     | 19,0                                                                             |
| Пористость истинная, % . . . . .                                           | 20,0                                              | 19,0                                     | 21,0                                                                             |
| Предел прочности при сжатии, МН/м <sup>2</sup> , при<br>температуре, °C:   |                                                   |                                          |                                                                                  |
| 20 . . . . .                                                               | 55,7                                              | 54,6                                     | 73,1                                                                             |
| 500 . . . . .                                                              | 32,0                                              | 51,0                                     | 50,1                                                                             |
| 800 . . . . .                                                              | 42,6                                              | 53,1                                     | 48,0                                                                             |
| Термическая стойкость, число водяных тепло-<br>смен:                       |                                                   |                                          |                                                                                  |
| до появления трещин . . . . .                                              | 1                                                 | 1                                        | 4—27                                                                             |
| до потери 20% массы . . . . .                                              | 24                                                | 26                                       | —                                                                                |
| Без потерь . . . . .                                                       | —                                                 | —                                        | 25—68                                                                            |
| Дополнительная усадка (—) или рост (+),<br>%, при 1400°C и выдержке, ч:    |                                                   |                                          |                                                                                  |
| 2 . . . . .                                                                | —0,1                                              | —0,2                                     | —0,0                                                                             |
| 4 . . . . .                                                                | —0,2                                              | —0,4                                     | —0,0                                                                             |
| 8 . . . . .                                                                | —0,3                                              | —0,5                                     | —0,0                                                                             |
| То же, при 1500°C и выдержке, ч:                                           |                                                   |                                          |                                                                                  |
| 2 . . . . .                                                                | +0,7                                              | —1,6                                     | 0,0                                                                              |
| 4 . . . . .                                                                | +0,5                                              | —2,6                                     | —0,1                                                                             |
| 8 . . . . .                                                                | +0,5                                              | —3,0                                     | +0,1                                                                             |
| То же, при 1600°C и выдержке, ч:                                           |                                                   |                                          |                                                                                  |
| 2 . . . . .                                                                | —                                                 | —2,5                                     | —0,5                                                                             |
| 4 . . . . .                                                                | —                                                 | —2,0                                     | —0,8                                                                             |
| 8 . . . . .                                                                | —                                                 | —2,5                                     | —0,6                                                                             |
| Температура начала деформации, °C, под на-<br>грузкой, МН/м <sup>2</sup> : |                                                   |                                          |                                                                                  |
| 0,196 . . . . .                                                            | 1400                                              | 1480                                     | 1580                                                                             |
| 0,392 . . . . .                                                            | 1330                                              | 1460                                     | 1520                                                                             |
| 0,49 . . . . .                                                             | 1280                                              | 1450                                     | 1520                                                                             |
| Деформация под нагрузкой 0,196 МН/м <sup>2</sup> , %:                      |                                                   |                                          |                                                                                  |
| при температуре, °C . . . . .                                              | 11,4                                              | 12,1                                     | 21,0                                                                             |
| при выдержке, ч . . . . .                                                  | 1330                                              | 1480                                     | 1570                                                                             |
|                                                                            | 10                                                | 9                                        | 11                                                                               |
| Деформация под нагрузкой 0,392 МН/м <sup>2</sup> , %:                      | 9,4                                               | 19,5                                     | —                                                                                |
| То же:                                                                     |                                                   |                                          |                                                                                  |
| при температуре, °C . . . . .                                              | 1400                                              | 1460                                     | —                                                                                |
| при выдержке, ч . . . . .                                                  | 11                                                | 11                                       | —                                                                                |

Таблица VI-15

Физико-химические свойства высокоглиноземистых изделий

| Показатели                                                               |  | Содержание глинозема, %            |                                                         |                             |                                         |                             |                                           |                                                                      |                                |
|--------------------------------------------------------------------------|--|------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|                                                                          |  | <45                                |                                                         | <55                         |                                         | <62                         |                                           | <74                                                                  |                                |
|                                                                          |  | Для лещадки доменных печей         | Для воздушонагревателей больших объемных доменных печей | Пробки, высокоглиноземистые | Для воздухо-нагревателей доменных печей | Для печей трубчатого станка | Для футеровки кессонов мартеновских печей | Для футеровки крышной зоны трубо-печей прямого восстановления железа | Для изделий типа силтинито-вых |
|                                                                          |  | Для изделий типа корундо-молитовых |                                                         |                             |                                         |                             |                                           |                                                                      |                                |
| Содержание $Al_2O_3 + TiO_2$ , %                                         |  | >45                                | >45                                                     | >45                         | >55                                     | >62                         | >74                                       | >75                                                                  | >62                            |
| Содержание $Fe_2O_3$ , %                                                 |  | <1,5                               | <2                                                      | —                           | <2                                      | <1,5                        | —                                         | —                                                                    | >1,5                           |
| Упругость, °С                                                            |  | >1750                              | >1750                                                   | >1770]                      | >1780                                   | >1800                       | >1830                                     | >1830                                                                | >1800                          |
| Температура начала деформации под нагрузкой 0,196 МН/м <sup>2</sup> , °С |  | >1400*                             | 1400                                                    | Не нормируется              | 1400                                    | —                           | 1530                                      | 1500                                                                 | —                              |
| Дополнительная усадка, %                                                 |  | <0,2*                              | <0,5*                                                   | <0,7*                       | <0,7*                                   | <1,2*                       | —                                         | <0,3*                                                                | —                              |
| Пористость кажущаяся, %                                                  |  | >16                                | >24                                                     | ( > 20 ) — ( < 25 )         | >22                                     | >24                         | >12                                       | >18                                                                  | —                              |
| Предел прочности при сжатии, МН/м <sup>2</sup>                           |  | <58,8                              | <19,6                                                   | —                           | >39,2                                   | <34,3                       | <38,4                                     | <38,4                                                                | <14,7                          |
| Термостойкость, число тепловых циклов                                    |  | —                                  | Не нормируется                                          | —                           | 15                                      | —                           | —                                         | —                                                                    | —                              |

\*<sup>1</sup> Под нагрузкой 0,392 МН/м<sup>2</sup>. \*<sup>2</sup> При 1400°С. \*<sup>3</sup> При 1500°С. \*<sup>4</sup> При 1550°С. \*<sup>5</sup> При 1600°С.

Таблица VI-16

Средняя теплоемкость огнеупорных материалов  $c_{ср}$ , кДж/(кг·°С), в интервале температур от 0 до  $t$ , °С

| Температура, °С | Шамот | Данас | Корунд | Магнезит | Температура, °С | Шамот | Данас | Корунд | Магнезит |
|-----------------|-------|-------|--------|----------|-----------------|-------|-------|--------|----------|
| 50              | 0,825 | 0,737 | —      | —        | 550             | 0,979 | 0,988 | —      | —        |
| 100             | 0,837 | 0,779 | 0,949  | —        | 600             | 0,996 | 1,017 | 1,051  | 1,105    |
| 150             | 0,854 | 0,816 | —      | —        | 650             | 1,013 | 1,043 | —      | 1,166    |
| 200             | 0,871 | 0,849 | 0,883  | 0,934    | 700             | 1,026 | 1,063 | 1,084  | 1,164    |
| 250             | 0,888 | 0,879 | —      | —        | 750             | 1,043 | 1,080 | —      | 1,172    |
| 300             | 0,900 | 0,909 | 0,934  | 0,996    | 800             | 1,059 | 1,097 | 1,139  | 1,176    |
| 350             | 0,917 | 0,929 | —      | —        | 850             | 1,076 | 1,109 | 1,214  | 1,185    |
| 400             | 0,934 | 0,950 | 0,925  | 1,047    | 900             | 1,089 | 1,122 | 1,231  | 1,189    |
| 450             | 0,950 | 0,967 | —      | —        | 950             | 1,105 | 1,130 | 1,248  | 1,193    |
| 500             | 0,963 | 0,980 | 1,038  | 1,080    | 1000            | 1,122 | 1,139 | 1,264  | —        |
|                 |       |       |        |          |                 |       |       | 1,277  | —        |

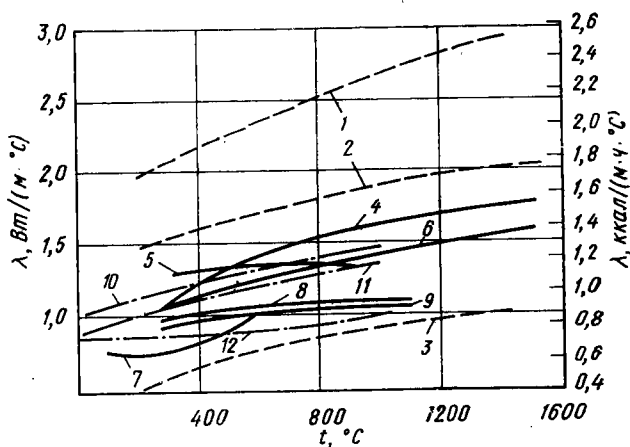


Рис. 43. Зависимости коэффициента теплопроводности  $\lambda$  от температуры  $t$  для огнеупорных материалов:

| Номер кривой      | Плотность $\rho$ ,<br>г/см <sup>3</sup> | Пористость,<br>% | Температура<br>обжига, °C |
|-------------------|-----------------------------------------|------------------|---------------------------|
| Каолиновый кирпич |                                         |                  |                           |
| 1                 | 2,36                                    | 11               | 1575                      |
| 2                 | 2,10                                    | 22               | 1575                      |
| 3                 | 1,27                                    | 49               | 1575                      |
| Шамотный кирпич   |                                         |                  |                           |
| 4                 | 2,15                                    | 19               | —                         |
| 5                 | 1,94                                    | 19               | 1310                      |
| 6                 | 1,90                                    | 27               | —                         |
| 7                 | 1,86                                    | 32               | —                         |
| 8                 | 1,85                                    | 29               | 1410                      |
| 9                 | 1,84                                    | 30               | 1470                      |
| Глинистый кирпич  |                                         |                  |                           |
| 10                | 2,15                                    | 5                | 1250                      |
| Шниферный кирпич  |                                         |                  |                           |
| 11                | 1,81                                    | 31               | —                         |
| Миасский кирпич   |                                         |                  |                           |
| 12                | 1,75                                    | 39               | —                         |

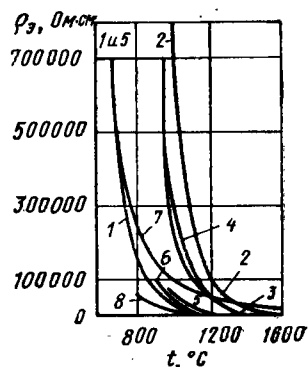


Рис. 44. Зависимость электросопротивления  $\rho_z$  огнеупорных материалов от температуры  $t$  (в скобках указана пористость, %):

1 — кварцевый песок прессованный (25,42); 2 — гидрат окиси глинозема (25,78); 3 — магнезит, обожженный при 1200°C (24,75); 4 — известь, обожженная при 1300°C (17,46); 5 — каолин, обожженный при 1500°C (17,46); 6 — диас, содержащий 95,8%  $\text{SiO}_2$  (29,51); 7 — шамотный кирпич, содержащий 53,12%  $\text{SiO}_2$ ; 8 — то же, содержащий 43,48  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (26,66)

Таблица VI-17

## Физико-химические свойства магнезитовых, магнезитохромитовых и хромомagneзитовых изделий

| Показатели                                                                         | Магнезитовые изделия | Хромомagneзитовые изделия | Магнезитохромитовые изделия для сводов <sup>1</sup> мартеновских и электросталеплавильных печей, изготавливаемые из хрома |              |         |              | Магнезитохромитовые <sup>1</sup> и деления для футеровки кессонов и других элементов сталеплавильных печей |              |               |            | Хромомagneзитовые и магнезитохромитовые безобжиговые изделия |                                     |                                     |                     | Изделия для кладки высокотемпературных туннелей и печей |   | Магнезитовые высокоокислительные изделия с повышенной плотностью |   |   |   |   |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|---------|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|---------------|------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|---------------------------------------------------------|---|------------------------------------------------------------------|---|---|---|---|
|                                                                                    |                      |                           | I сорт                                                                                                                    |              | II сорт | сарановского | киперсайского                                                                                              | сарановского | киперсайского | для сводов | для стен головок и вертикальных каналов                      | для сводов с содержанием хрома <60% | для сводов с содержанием хрома <50% | Магнезитохромитовые | Хромомagneзитовые                                       |   |                                                                  |   |   |   |   |
|                                                                                    |                      |                           | киперсайского                                                                                                             | сарановского |         |              |                                                                                                            |              |               |            |                                                              |                                     |                                     |                     |                                                         |   |                                                                  |   |   |   |   |
| Содержание MgO, % . . . . .                                                        | >91,0                | >42                       | >60                                                                                                                       | —            | >60     | —            | >60                                                                                                        | >42          | >40           | >45        | >57                                                          | >42                                 | >86                                 | —                   | —                                                       | — | —                                                                |   |   |   |   |
| Содержание CaO, % . . . . .                                                        | ≤3,0                 | —                         | —                                                                                                                         | —            | —       | —            | —                                                                                                          | —            | —             | —          | —                                                            | —                                   | —                                   |                     |                                                         |   |                                                                  | — | — | — | — |
| Содержание Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , % . . . . .                            | —                    | >15                       | >12—18                                                                                                                    | >8—13        | >12—18  | >8—13        | >12—18                                                                                                     | >16          | >20           | >16        | >8                                                           | >15                                 | —                                   |                     |                                                         |   |                                                                  |   |   |   |   |
| Предел прочности при сжатии, МН/м <sup>2</sup> . . . . .                           | >39,2*1              | >24,5*2                   | >24,5                                                                                                                     | —            | >19,6   | —            | >39,2                                                                                                      | >24,5        | >44,1         | >44,1      | —                                                            | >14,7                               | —                                   | —                   | —                                                       | — | —                                                                |   |   |   |   |
| Объемная масса, г/см <sup>3</sup> (с учетом пористости) . . . . .                  | >2,6*1               | Не нормируется            | —                                                                                                                         | —            | —       | —            | —                                                                                                          | —            | —             | —          | —                                                            | —                                   | —                                   |                     |                                                         |   |                                                                  | — | — | — | — |
| Плотность, г/см <sup>3</sup> , без учета пористости . . . . .                      | —                    | То же                     | —                                                                                                                         | —            | —       | —            | —                                                                                                          | —            | —             | —          | —                                                            | —                                   | —                                   |                     |                                                         |   |                                                                  |   |   |   |   |
| Температура начала деформации под нагрузкой 0,196 МН/м <sup>2</sup> , °С . . . . . | 1500                 | 1450                      | 1500                                                                                                                      | 1500         | 1500    | 1500         | 1500                                                                                                       | 1500         | 1500          | 1500       | 1500                                                         | 1500                                | 1500                                | —                   | —                                                       | — | —                                                                |   |   |   |   |
| Пористость кажущаяся, % . . . . .                                                  | Не нормируется       | ≤24*2                     | ≤23*3                                                                                                                     | ≤24*3        | ≤24*3   | ≤24*3        | ≤24*3                                                                                                      | ≤24*3        | ≤24*3         | ≤24*3      | ≤24*3                                                        | ≤24*3                               | ≤24*3                               |                     |                                                         |   |                                                                  | — | — | — | — |
| Термическая стойкость, число теплосмен . . . . .                                   | —                    | —                         | >25                                                                                                                       | >25          | >25     | >25          | >25                                                                                                        | >25          | >25           | >25        | >25                                                          | >25                                 | >25                                 |                     |                                                         |   |                                                                  |   |   |   |   |

\*1 Для изделий II сорта допускается предел прочности при сжатии  $\geq 34,3$  МН/м<sup>2</sup> и плотность с учетом пористости  $\geq 2,56$  г/см<sup>3</sup>. \*2 Для изделий II сорта допускается предел прочности при сжатии  $\geq 19,6$  МН/м<sup>2</sup> и пористость  $\leq 25\%$ . \*3 Для кирпичей пикового, прямого и клиновидного размером 520 мм допускается пористость для изделий I сорта 24%, для изделий II сорта 26%.

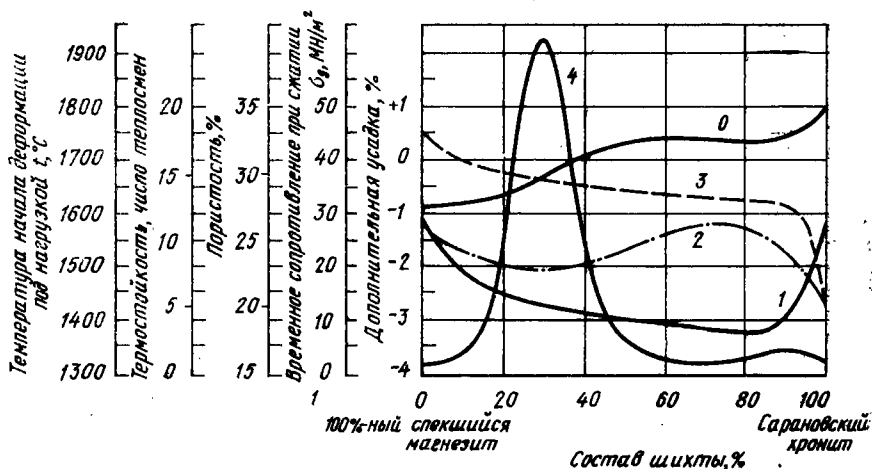


Рис. 45. Изменение свойств обжиговых хромомагнезитовых огнеупоров:

0 — дополнительная усадка при обжиге 1600°C и выдержке, 2 ч; 1 — предел прочности при сжатии; 2 — пористость; 3 — термостойкость изделий при водяном охлаждении; 4 — температура  $t$  начала деформации под нагрузкой

### Свойства углеродистых изделий

|                                                                    |                      |
|--------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Плотность (с учетом пористости), г/см <sup>3</sup>                 | 1,55—1,65            |
| Пористость, %:                                                     |                      |
| кажущаяся                                                          | 15—18                |
| истинная                                                           | 16—19                |
| Предел прочности, при сжатии, МН/м <sup>2</sup>                    | 24,5—29,4            |
| Деформация под нагрузкой при высоких температурах                  | Не деформируется     |
| Коэффициент линейного расширения в интервале 0—700°C               | $0,37 \cdot 10^{-5}$ |
| Удельное электросопротивление, Ом·см                               | $5,5 \cdot 10^{-3}$  |
| Теплопроводность при средней температуре 400°C, Вт/(м·°C)          | 6,75—7,10            |
| Дополнительный линейный рост после обжига, %, при температуре, °C: |                      |
| 1400                                                               | 0,0—0,0              |
| 1500                                                               | 0,0—0,1              |
| 1600                                                               | 0,0—0,3              |
| Истираемость (на круге с подсыпкой песком), г/см <sup>2</sup>      | 0,25—0,55            |
| Содержание золы, %                                                 | 2,5—3,0              |

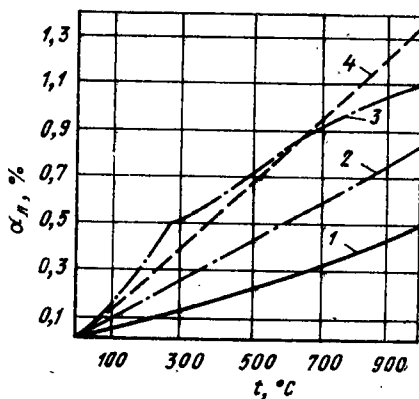


Рис. 46. Зависимость коэффициента линейного расширения  $\alpha_L$  важнейших огнеупоров от температуры  $t$ :  
1 — шамотных; 2 — корундовых; 3 — полукислых; 4 — магнезитовых

Таблица VI-18

Свойства карбонидовых изделий Семилукского завода

| Показатели                                         | I класс | II класс | II класс | I класс |
|----------------------------------------------------|---------|----------|----------|---------|
| Содержание, %:                                     |         |          |          |         |
| SiC                                                | 84,38   | 85,21    | 84,07    | 84,14   |
| SiO <sub>2</sub>                                   | 10,51   | 10,70    | 10,70    | 11,26   |
| R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                      | 3,94    | 3,46     | 3,98     | 4,06    |
| Плотность, г/см <sup>3</sup> , с учетом пористости | 2,43    | 2,34     | 2,45     | 2,51    |
| Пористость кажущаяся, %                            | 21,0    | 19,0     | 21,1     | 19,6    |
| Предел прочности при сжатии, МН/м <sup>2</sup>     | 61,1    | 41,5     | 73,7     | 75,3    |
| Водопоглощение, %                                  | 8,6     | 10,6     | 8,7      | 7,8     |
| Потери при прокаливании, %                         | 0,29    | 0,14     | 0,32     | 0,37    |
| Температура деформации под нагрузкой, °C           | 1538    | 1540     | 1540     | —       |
| Жаростойкость, °C                                  | 1500    | >1500    | —        | —       |
| Термостойкость, число теплосмен                    | 100—300 | 100—300  | 100—300  | —       |
| Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C)            | 8—13    | 8—13     | 8—13     | —       |

Таблица VI-19

Средние теплоемкости высокоогнеупорных материалов  $c_{cp}$ , кДж/(кг·°C)

| Материал                                        | $c_{cp}$ в интервале температур от указанной до $t$ , °C |                  |                    |                    |                |                 |                 |                  |
|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------|--------------------|--------------------|----------------|-----------------|-----------------|------------------|
|                                                 | 100                                                      | 200              | 400                | 600                | 800            | 1000            | 1200            | 1400             |
| Корунд (искусственный), от 20°C                 | —                                                        | 0,883            | 0,967              | 1,051              | 1,139          | 1,273           | —               | —                |
| Глинозем, от 15°C                               | 0,873                                                    | 0,921<br>(95)    | 1,005<br>(420)     | 1,029<br>(520)     | —              | —               | —               | —                |
| Муилит, от 20°C                                 | —                                                        | 0,674            | 0,699              | 0,724              | 0,733          | —               | —               | —                |
| Кианит (борисовский), от 20°C                   | —                                                        | —                | 0,963              | 1,029              | 1,068          | 1,105           | 1,130           | —                |
| Андалузит (Семиз-Бугу), от 20°C                 | —                                                        | —                | 0,939              | 1,089              | 1,156          | 1,185           | 1,202           | —                |
| Силлиманит, от 0°C                              | —                                                        | —                | 0,959              | 1,029              | 1,068          | 1,080           | 1,097           | —                |
| Муилитовые изделия, от 20°C                     | —                                                        | —                | —                  | 1,089              | —              | —               | 1,202           | —                |
| Магнезитовые изделия 88% MgO, от 25°C           | —                                                        | —                | —                  | 1,109<br>(605)     | 1,147<br>(825) | 1,193<br>(1042) | 1,223<br>(1115) | —                |
| Спекшийся магнезит                              | —                                                        | 1,059            | 1,151              | 1,214              | 1,323          | 1,357           | 1,461<br>(1300) | —                |
| Серпентин, от 20°C                              | —                                                        | —                | 1,181              | 1,306              | 1,691          | 1,725           | 1,612           | —                |
| Шпинель, от 0°C                                 | —                                                        | 0,896<br>(0—243) | 0,959<br>(399)     | 1,047<br>(632)     | 1,068<br>(886) | 1,076<br>(1042) | —               | —                |
| Известь (плавленная), от 0°C                    | 0,699                                                    | 0,720<br>(190)   | 0,758<br>(375—400) | 0,808<br>(590—680) | —              | —               | —               | —                |
| Окись циркония (99% ZrO <sub>2</sub> ), от 25°C | 0,549                                                    | —                | —                  | 0,574              | 0,528—561,3    | 0,657           | 0,699           | 0,733            |
| Циркон (ильменский), от 20°C                    | —                                                        | —                | 0,674              | 0,699              | 0,729          | 0,762           | 0,791           | —                |
| Хромитовые изделия                              | —                                                        | 0,745<br>(218)   | 0,879<br>(382)     | 0,925<br>(579)     | 0,900<br>(894) | —               | —               | —                |
| Хромит (халиловский), от 20°C                   | —                                                        | —                | 0,929              | 0,938              | 1,026          | 1,135           | 1,047           | —                |
| Карборунд (кристаллический), от 0°C             | —                                                        | 0,976            | 1,159              | 1,151              | 0,942          | 0,955           | —               | —                |
| Карборундовые изделия типа карбофракс:          |                                                          |                  |                    |                    |                |                 |                 |                  |
| 90% SiC                                         | —                                                        | —                | —                  | 1,055              | 1,068          | 1,109           | 1,114           | 1,143            |
| 92% SiC                                         | —                                                        | —                | —                  | —                  | —              | 1,105           | 1,114           | 1,214<br>(1350)  |
| Графит                                          | 0,873                                                    | 1,063<br>(138)   | —                  | —                  | —              | 1,955<br>(977)  | —               | 1,98<br>(0—2000) |

Примечание. В скобках даны температуры конца интервала, всего интервала или температура, при которой проведено исследование.

Таблица VI-20

## Виды огнеупорных изделий, применяемых металлургической промышленности

| Объект применения                                                                                    | Виды огнеупорных изделий   |       |                        |                                                                    |            |             |             |             |                           |                         | Заправочные материалы |     |  |  | Мертели, огнеупор-<br>ные попошки и мас-<br>сы |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------|------------------------|--------------------------------------------------------------------|------------|-------------|-------------|-------------|---------------------------|-------------------------|-----------------------|-----|--|--|------------------------------------------------|
|                                                                                                      | шамотные и по-<br>лукистые | динас | высокоглинозем-<br>ные | магнезитовые,<br>хромомагнезито-<br>вые и магнезито-<br>хромитовые | форситовые | глинозистые | карбундовые | легковесные | магнезитовый по-<br>рошок | доломит обож-<br>женный | доломит сырой         |     |  |  |                                                |
| Коксовые печи                                                                                        | +++                        | +     | +                      | +++                                                                |            |             |             | +++         |                           |                         |                       | +++ |  |  |                                                |
| Доменные печи                                                                                        | +++                        | +     | +                      | +++                                                                |            |             |             | +++         |                           |                         |                       | +++ |  |  |                                                |
| Воздухонагреватели                                                                                   | +++                        | +     | +                      | +++                                                                |            |             |             | +++         |                           |                         |                       | +++ |  |  |                                                |
| Чугунолитейные ковши                                                                                 | +++                        | +     | +                      | +++                                                                |            |             |             | +++         |                           |                         |                       | +++ |  |  |                                                |
| Мартеновские печи                                                                                    | +++                        | +     | +                      | +++                                                                |            |             |             | +++         |                           |                         |                       | +++ |  |  |                                                |
| Электросталеплавильные печи                                                                          | +++                        | +     | +                      | +++                                                                |            |             |             | +++         |                           |                         |                       | +++ |  |  |                                                |
| Конверторы:                                                                                          | +++                        | +     | +                      | +++                                                                |            |             |             | +++         |                           |                         |                       | +++ |  |  |                                                |
| основные                                                                                             | +++                        | +     | +                      | +++                                                                |            |             |             | +++         |                           |                         |                       | +++ |  |  |                                                |
| кислые                                                                                               | +++                        | +     | +                      | +++                                                                |            |             |             | +++         |                           |                         |                       | +++ |  |  |                                                |
| Сталеразливочный припас:                                                                             | +++                        | +     | +                      | +++                                                                |            |             |             | +++         |                           |                         |                       | +++ |  |  |                                                |
| футеровка ковшей                                                                                     | +++                        | +     | +                      | +++                                                                |            |             |             | +++         |                           |                         |                       | +++ |  |  |                                                |
| стопорные трубки                                                                                     | +++                        | +     | +                      | +++                                                                |            |             |             | +++         |                           |                         |                       | +++ |  |  |                                                |
| пробки и стаканы                                                                                     | +++                        | +     | +                      | +++                                                                |            |             |             | +++         |                           |                         |                       | +++ |  |  |                                                |
| сифонные изделия                                                                                     | +++                        | +     | +                      | +++                                                                |            |             |             | +++         |                           |                         |                       | +++ |  |  |                                                |
| прибыльные надставки                                                                                 | +++                        | +     | +                      | +++                                                                |            |             |             | +++         |                           |                         |                       | +++ |  |  |                                                |
| футеровка желобов                                                                                    | +++                        | +     | +                      | +++                                                                |            |             |             | +++         |                           |                         |                       | +++ |  |  |                                                |
| Нагревательные и термические печи прокатных,<br>трубопрокатных, термических и калибровочных<br>цехов | +++                        | +     | +                      | +++                                                                |            |             |             | +++         |                           |                         |                       | +++ |  |  |                                                |
| Печи чугунолитейных, сталелитейных, кузнечно-<br>прессовых цехов                                     | +++                        | +     | +                      | +++                                                                |            |             |             | +++         |                           |                         |                       | +++ |  |  |                                                |
| Печи для обжига доломита и известняка                                                                | +++                        | +     | +                      | +++                                                                |            |             |             | +++         |                           |                         |                       | +++ |  |  |                                                |
| Тепловые агрегаты огнеупорных цехов                                                                  | +++                        | +     | +                      | +++                                                                |            |             |             | +++         |                           |                         |                       | +++ |  |  |                                                |

Примечание. Знаком плюс отмечены случаи, когда огнеупорное изделие применяется, знаком минус — случаи, когда оно обычно не применяется.

Таблица VI-21

## Шлакоустойчивость огнеупорных изделий

| Огнеупоры                             | Основные<br>шлаки<br>и<br>окислы | Кислые<br>шлаки<br>и окислы | Окисли-<br>тельные<br>реагенты | Восстанови-<br>тельные реа-<br>генты | Ме-<br>таллы |
|---------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--------------|
| Корундовые . . . . .                  | У                                | У                           | У                              | У, до 1800°C                         | О            |
| Бокситовые . . . . .                  | У                                | У                           | У                              | У                                    | О            |
| Муллитовые (силлиманитовые) . . . . . | У                                | О                           | О                              | У                                    | О            |
| Плавленные муллитовые . . . . .       | О                                | О                           | О                              | О                                    | О            |
| Магнезитовые . . . . .                | О                                | П                           | О                              | У, до 1450°C                         | О            |
| Хромитовые . . . . .                  | О                                | У                           | О                              | У, до 1500°C                         | О            |
| Хромомагнезитовые . . . . .           | О                                | У                           | О                              | У, до 1500°C                         | О            |
| Циркониевые . . . . .                 | У                                | О                           | О                              | П                                    | О            |
| Цирконовые . . . . .                  | У                                | О                           | О                              | П                                    | О            |
| Карборундовые . . . . .               | П                                | У                           | П                              | О                                    | П            |
| Коксовые . . . . .                    | О                                | У                           | П                              | О                                    | О            |
| Графитовые . . . . .                  | О                                | У                           | П                              | О                                    | О            |
| Шамотные . . . . .                    | У                                | У                           | О                              | О, до 1400°C                         | У            |
| Динасовые . . . . .                   | П                                | О                           | О                              | О, до 1600 С                         | У            |

Примечание. О — отличная, У — удовлетворительная; П — плохая шлакоустойчивость.

Таблица VI-22

Температуры, °С, при которых начинаются реакции между различными огнеупорами, соприкасающимися между собой

| Огнеупор                                                   | Изделия<br>из<br>огнеупор-<br>ной<br>глины | Высоко-<br>глинозе-<br>мистые<br>изделия<br>(70%<br>глинозема) | Хромито-<br>вые<br>изделия | Маложеле-<br>зистый<br>магнезит | Обычный<br>магнезит | Форстерит      |
|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------|----------------|
| Динас . . . . .                                            | 1500                                       | 1600                                                           | Нет<br>реакций             | 1500                            | 1500                | 1700           |
| Изделия из огнеупорной<br>глины . . . . .                  | —                                          | Нет<br>реакций                                                 | 1600                       | 1500                            | 1400                | 1500           |
| Высокоглиноземистые из-<br>делия (70% глинозема) . . . . . | —                                          | —                                                              | 1600                       | 1700                            | 1500                | 1700           |
| Хромитовые изделия . . . . .                               | —                                          | —                                                              | —                          | Нет<br>реакций                  | Нет<br>реакций      | Нет<br>реакций |
| Маложелезистый магнезит . . . . .                          | —                                          | —                                                              | —                          | —                               | То же               | То же          |
| Обычный магнезит . . . . .                                 | —                                          | —                                                              | —                          | —                               | »»                  | »»             |

Таблица VI-23

## Характеристика и состав некоторых жароупорных бетонов

| Бетон                                                        | Компоненты бетона    |                                               |                                     | Допустимая максимальная температура элементов конструкций, °С | Марка бетона | Прочность при максимальной допустимой температуре, МН/м² |
|--------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------|----------------------------------------------------------|
|                                                              | вяжущее              | тонкомолотая добавка                          | мелкий и крупный заполнитель        |                                                               |              |                                                          |
| Жароупорный бетон на глиноземе-мистом цементе                | Глиноземистый цемент | —                                             | Хромитовая руда                     | 1400                                                          | 150—300      | 5,0—10,0                                                 |
| То же                                                        | То же                | —                                             | Шамот огнеупорностью не ниже 1730°С | 1300                                                          | 100—300      | 3,5—10,0                                                 |
| Жароупорный бетон на портландцементе с тонкомолотой добавкой | Портландцемент       | Шамот огнеупорностью не ниже 1730°С           | Шамот огнеупорностью не ниже 1730°С | 1200                                                          | 100—300      | 3,5—10,0                                                 |
| То же                                                        | То же                | Шамот огнеупорностью не ниже 1610°С или кварц | Шамот огнеупорностью не ниже 1610°С | 1100                                                          | 100—300      | 3,5—10,0                                                 |

**Состав жаропрочного хромомagneзитового бетона для тепловой изоляции подовых труб огнеупорными блоками, % (по массе)**

|                                                                                             |                               |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Глиноземистый цемент марки 400—500 с содержанием $\text{SiO}_2$ не более 11% по ГОСТ 969—66 | 15                            |
| Хромитовая руда (50% 7—2 мм, 45% 2—0,88 мм, 5% <0,88 мм; по ТУ 2943—51)                     | 60                            |
| Бой магнезитохромитового кирпича по ТУ 2886—54                                              | 25                            |
| Количество воды                                                                             | 7—8% к количеству сухой массы |

Таблица VI-24

## Физико-механические свойства жароупорного бетона

| Показатели                                                   | На глиноземистом цементе с хромитовым заполнителем | На глиноземистом цементе с шамотным заполнителем | На портландцементе с шамотным заполнителем |
|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Температура деформации бетона под нагрузкой 0,196 МН/м², °С: |                                                    |                                                  |                                            |
| начало деформации                                            | 1350                                               | 1250                                             | 1100                                       |
| конец деформации                                             | 1450                                               | 1350                                             | 1250                                       |

| Показатель                                                                         | На глиноземистом цементе с хромитовым заполнителем | На глиноземистом цементе с шамотным заполнителем | На портландцементе с шамотным заполнителем |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Коэффициент линейного термического расширения в интервале от 20 до 900°C . . . . . | $6,5 \cdot 10^{-6}$                                | $7,5 \cdot 10^{-6}$                              | $7,5 \cdot 10^{-6}$                        |
| Линейная усадка при максимальных температурах, % . . . . .                         | 0,4—1,0                                            | 0,4—1,0                                          | 0,4—1,0                                    |
| Плотность (с учетом пористости), т/м <sup>3</sup> . . . . .                        | 2,8—2,9                                            | 1,8—1,9                                          | 1,8—1,9                                    |

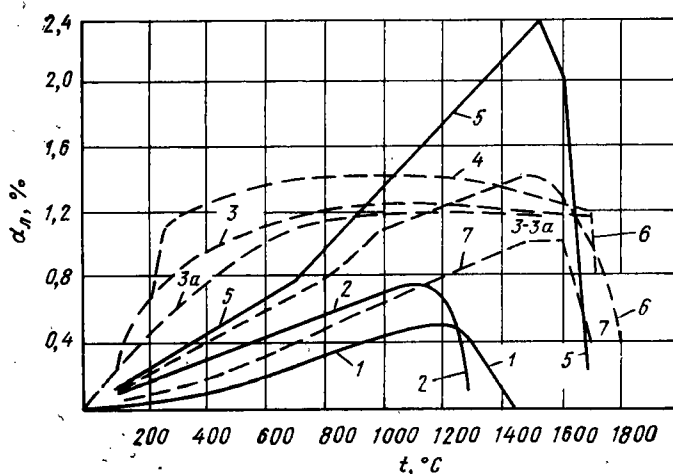


Рис. 47. Зависимость полного линейного расширения  $\alpha_L$  некоторых огнеупорных изделий от температуры  $t$ : 1 — шамотный кирпич; 2 — полукислый огнеупорный кирпич; 3 — динас; 3a — легковесный динас; 4 — динас, вторично нагретый до 1650—1670°C; 5 — магнезитовый кирпич; 6 — хромитовый кирпич; 7 — высокоглиноземистый кирпич

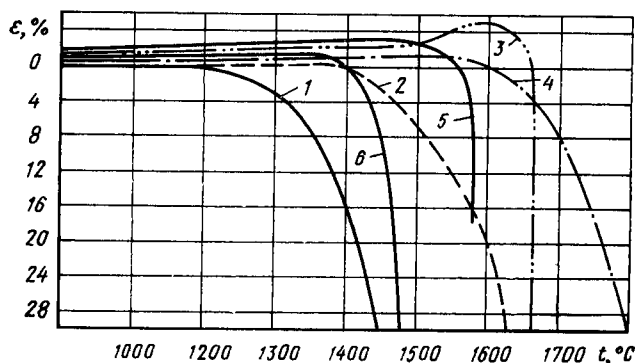


Рис. 48. Характеристики деформации  $\epsilon$  под нагрузкой при высоких температурах  $t$  для важнейших огнеупоров: 1, 2 — шамот; 3 — динас; 4 — высокоглиноземистый (70%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ); 5 — магнезит; 6 — полукислый

Таблица VI-25

## Характеристика магнезиальных огнеупорных бетонов

| Бетон                 | Заполнитель                                                                                                               | Пористость, % | Предел прочности при сжатии, МН/м <sup>2</sup> | Изменение размеров при нагреве до 1650°C и выдержке 4 ч, % | Температура начала деформации образцов под нагрузкой, 0,196 МН/м <sup>2</sup> , °C |                                      |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
|                       |                                                                                                                           |               |                                                |                                                            | необожженных                                                                       | обожженных при 1650°C и выдержке 4 ч |
| Хромомагнезитовый     | 70% хромита крупностью <7 мм, 60% хромита крупностью <2 мм и 10% титаноглиноземистого шлака крупностью 2—0,5 мм . . . . . | 12—14<br>14,0 | 30<br>50                                       | —0,7<br>+0,3                                               | 1480<br>1410                                                                       | 1490<br>1690                         |
| Магнезитохромитовый   | 70% лома магнезитохромитового кирпича крупностью <5 мм и 10% титаноглиноземистого шлака 2—0,5 мм . . . . .                | 16,0          | 50                                             | —0,6                                                       | 1430                                                                               | 1580                                 |
| Магнезитокорундовый   | 57% боя магнезитового кирпича крупностью <2 мм и 10% электроплавленного корунда <0,7 мм . . . . .                         | 14,0          | 33                                             | +0,4                                                       | 1450                                                                               | 1560                                 |
| Оливинитомагнезитовый | 70% оливинита крупностью <7 мм . . . . .                                                                                  | 10,6          | 40                                             | —0,6                                                       | 1640                                                                               | 1690                                 |
| Дунитомагнезитовый    | 70% дунита, обожженного при 1450°C, крупностью <7 мм . . . . .                                                            | 17,6          | 42                                             | —0,3                                                       | 1580                                                                               | 1780                                 |

Таблица VI-26

Коэффициент объемного расширения  $\beta \cdot 10^6$  огнеупорных материалов,  $1^\circ\text{C}$ 

| Материал                                                        | Температура, °C |            |           |           |              |                |                |               |      |      |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------|------------|-----------|-----------|--------------|----------------|----------------|---------------|------|------|
|                                                                 | до 150          | 200        | 400       | 600       | 800          | 1000           | 1200           | 1400          | 1600 |      |
| Корунд искусственный (99% $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) . . . . .   | —               | —          | —         | —         | 7,9 (25—800) | —              | —              | —             | —    | —    |
| Корунд естественный . . .                                       | 6,0             | —          | —         | —         | —            | —              | —              | —             | —    | —    |
| Корундовые изделия с 10% глины . . . . .                        | —               | —          | —         | —         | —            | 6,24 (25—1000) | —              | —             | —    | —    |
| Бокситовые изделия . . .                                        | —               | 5,5        | 6,3 (300) | 7,2       | —            | 8,0            | —              | —             | —    | —    |
| То же, из плавного боксита (64% $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) . . . | —               | —          | —         | —         | —            | —              | —              | 7,1 (0—1370)  | —    | —    |
| Мулит (обоженный до 1800°C) . . . . .                           | —               | —          | —         | —         | —            | —              | —              | 5,4 (20—1400) | —    | —    |
| Мулит искусственный . .                                         | 3,6             | 3,9 (250)  | 4,5 (375) | 5,9 (575) | 6,0 (850)    | —              | —              | —             | —    | —    |
| Магнезитовые изделия (2,5% $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) . . . . .  | —               | —          | —         | —         | —            | 13,2 (20—1000) | —              | —             | —    | —    |
| Магнезит спекшийся (88% $\text{MgO}$ ) . . . . .                | —               | —          | —         | —         | —            | —              | 12,6 (20—1200) | 16,1 (0—1430) | —    | —    |
| Магнезитовые изделия, от 20°C . . . . .                         | —               | —          | —         | —         | —            | 11,0           | —              | —             | —    | 11,9 |
| Магнезит плавленый (95% $\text{MgO}$ ), от 20°C . . . . .       | 7,24 (50)       | 13,3 10,51 | 11,78     | 12,75     | 13,1         | 13,61          | —              | —             | —    | —    |

| Материал                                                       | Температура, °С |                   |              |              |                     |                     |      |                    |                 |
|----------------------------------------------------------------|-----------------|-------------------|--------------|--------------|---------------------|---------------------|------|--------------------|-----------------|
|                                                                | до 150          | 200               | 400          | 600          | 800                 | 1000                | 1200 | 1400               | 1600            |
| Форстеритовые изделия                                          | —               | —                 | —            | —            | —                   | 10,7<br>(20 — 1000) | —    | —                  | —               |
| Окись циркония (плавленная)                                    | —               | —                 | —            | —            | 6,2<br>(25—800)     | —                   | —    | —                  | 5,9<br>(0—1600) |
| Циркон                                                         | 3,3<br>(150)    | 3,7<br>(250)      | 4,1<br>(375) | 4,9<br>(575) | 4,5<br>(850)        | —                   | —    | 6,4<br>(0—1510)    | —               |
| Циркон электроплавный                                          | 4,2             | —                 | —            | —            | —                   | —                   | —    | —                  | —               |
| Хромитовые изделия<br>(50,23% Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | —               | 6,0               | 6,3<br>(300) | 6,7          | —                   | 8,0                 | —    | 10,7<br>(0—1530)   | —               |
| Карборундовые изделия типа карбофракс (85% SiC)                | —               | 5,39<br>(100—200) | —            | —            | 4,38<br>(700 — 800) | 4,7<br>(200—900)    | —    | 5,0<br>(25 — 1400) | —               |
| Карборундовые изделия типа рефракс                             | —               | —                 | —            | —            | —                   | 4,7<br>(800—900)    | —    | 5,0<br>(25 — 1400) | —               |
| Графит                                                         | 7,8 (40)        | —                 | —            | —            | —                   | —                   | —    | —                  | —               |
| Для сравнения:                                                 |                 |                   |              |              |                     |                     |      |                    |                 |
| шамот, от 0°                                                   | —               | 8,5               | 5,8          | 5,1          | 5,1                 | 5,3                 | —    | —                  | —               |
| динас, от 20°                                                  | 12,2 (100)      | 22,5              | 25,1         | 21,5         | 14,6                | 12,3                | 10,3 | —                  | —               |

Примечание. В скобках даны температуры конца интервала, всего интервала или температуры, при которой проведено исследование.

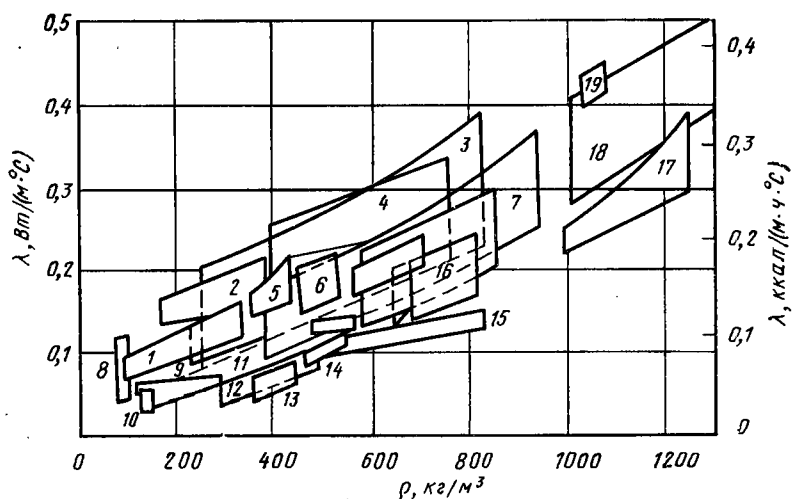


Рис. 49. Зависимость коэффициента теплопроводности  $\lambda$  от плотности  $\rho$  по опытным данным для некоторых теплоизоляционных материалов: 1 — торф; 2 — фибролит; 3 — пенобетон; 4 — кислосиликаты; 5 — пенопемзобетон, 6 — пробковый кирпич; 7 — термоизоляционный кирпич; 8 — шевелни; 9 — торфо-плита; 10 — прессованный торф; 11 — шлаковая пробка; 12 — стром-органик; 13 — теплая штукатурка; 14 — пенобетон; 15 — гранулированный шлак; 16 — газобетон, 17 — арктический туф; 18 — шлак; 19 — известково-трепельный органик;

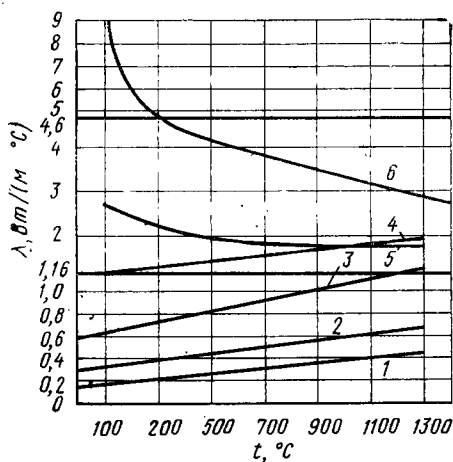


Рис. 50. Зависимость коэффициента теплопроводности  $\lambda$  для некоторых огнеупоров от температуры  $t$ : 1 — ультралегковес; 2 — легковесный шамот; 3 — легковесный динас; 4 — динас; 5 — форстерит; 6 — магнезит

#### Состав и свойства некоторых исследованных огнеупоров

| Показатели                                       | Огнеупорный материал                                   |                                                             |                                                                              |                                              |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
|                                                  | ультралегковес<br>Запорожского<br>завода<br>(кривая 1) | легковесный<br>Первоураль-<br>ского<br>завода<br>(кривая 3) | форстерито-<br>вый кирпич<br>Пантелеймо-<br>новского<br>завода<br>(кривая 5) | чехосло-<br>вацкий<br>магнезит<br>(кривая 6) |
| Содержание, %:                                   |                                                        |                                                             |                                                                              |                                              |
| $\text{SiO}_2$ . . . . .                         | 57,96                                                  | 92,95                                                       | 27,10                                                                        | 1,56                                         |
| $\text{MgO}$ . . . . .                           | 1,14                                                   | 0,22                                                        | 60,59                                                                        | 88,10                                        |
| $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ . . . . . | 35,73                                                  | 1,75                                                        | 1,94                                                                         | 1,35                                         |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . . . . .                | 1,67                                                   | 1,62                                                        | 8,66                                                                         | 6,40                                         |
| $\text{CaO}$ . . . . .                           | 0,57                                                   | 3,00                                                        | 1,58                                                                         | 2,55                                         |
| Объемная масса, г/см <sup>3</sup> . . . . .      | 0,31                                                   | 1,09                                                        | 2,55                                                                         | 3,73                                         |
| Кажущаяся пористость, % . . . . .                | 88,0                                                   | 53,5                                                        | 24,5                                                                         | 22,7                                         |
| П. п. п. . . . .                                 | 0,46                                                   | 0,20                                                        | 0,28                                                                         | 0,26                                         |

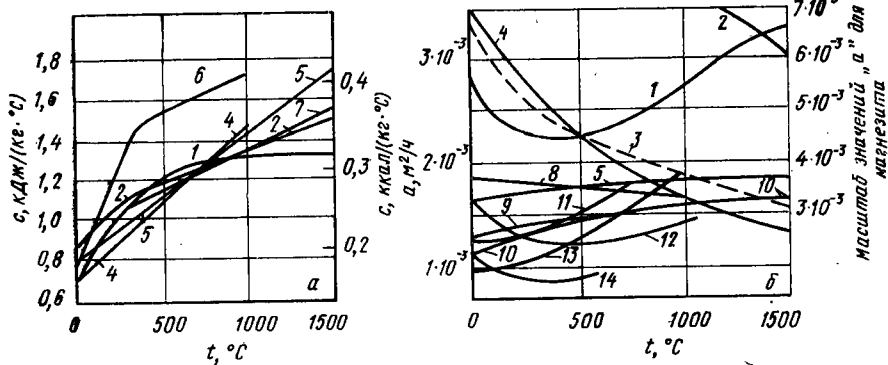


Рис. 51. Зависимость истинной теплоемкости  $c(a)$  и коэффициента температуропроводности  $a(b)$  огнеупорных и изоляционных материалов от температуры (при  $\rho$ ,  $\text{кг/м}^3$ ): 1 — днас (1980); 2 — магнезит; 3 — магнезит (2700); 4 — хромомагнезит (2870); 5 — шамот (1860); 6 — углеродистый кирпич; 7 — высокоглиноземистый кирпич; 8 — пеношамот (800); 9 — красный кирпич (1600); 10 — шамот-легковес с выгорающими добавками (1250); 11 — шлаковата (250); 12 — ирбитский трепельный кирпич (930); 13 — пенотрепельный кирпич (460); 14 — новоасбозурит (710)

## ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица VI-27

Основные свойства пористых огнеупорных изделий (легковесов)

| Плотность<br>(с учетом<br>пористости),<br>$\text{г/см}^3$ | Предел<br>прочности<br>при<br>сжатии,<br>$\text{МН/м}^2$ | Огнеупор-<br>ность, $^{\circ}\text{C}$ | Начало<br>деформации<br>под нагрузкой<br>$0,196 \text{ МН/м}^2$<br>при<br>температуре,<br>$^{\circ}\text{C}$ | Допустимая<br>температура,<br>$^{\circ}\text{C}$ | Область применения |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------|
|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------|

### Химлегковес

0,74 | 2,9—3,9 | 1710 | 1190 | 1200

### Пенолегковес

0,54—0,61 | 2,4—3,4 | 1710—1730 | 1130—1260 | 1150—1300

Для печей, работающих  
непрерывно без резких  
колебаний температу-  
ры

### Ультралегковес

0,27—0,33 | 0,7—1,0 | 1710—1730 | 1130 | 1100

Защитная изоляция вы-  
сокотемпературных пе-  
чей

### Пеношамот

0,95 | 2,94 | 1740 | 1340 | 1350  
0,6 | 1,0 | 1630 | 1280 | 1300

### Легковес с выгорающими добавками

1,3 | 4,90 | 1750 | 1300 | 1300  
1,0 | 2,94 | 1700 | 1250 | 1260

Для всех печей

Таблица VI-28

Зависимость коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , Вт/(м·°С), от температуры для волокнистых и сыпучих материалов

| Материал                                    | Плотность $\rho$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> | Формула для определения<br>$\lambda$ , Вт/(м·°С) |
|---------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Асбест (длинноволокнистый) . . . . .        | 150                                     | $0,639 + 1,86 \cdot 10^{-4} t_{cp}$              |
|                                             | 300                                     | $0,08 + 1,86 \cdot 10^{-4} t_{cp}$               |
| Асбест VI сорта . . . . .                   | 400—450                                 | $0,106 + 1,86 \cdot 10^{-4} t_{cp}$              |
|                                             | 800                                     | $0,209 + 1,86 \cdot 10^{-4} t_{cp}$              |
| Асбозурит . . . . .                         | 400—450                                 | $0,100 + 3,61 \cdot 10^{-4} t_{cp}$              |
| Вата минеральная . . . . .                  | 150                                     | $0,042 + 1,67 \cdot 10^{-4} t_{cp}$              |
|                                             | 200                                     | $0,047 + 1,67 \cdot 10^{-4} t_{cp}$              |
|                                             | 250                                     | $0,053 + 1,67 \cdot 10^{-4} t_{cp}$              |
| Вата минеральная гранулированная) . . . . . | 175                                     | $0,044 + 1,67 \cdot 10^{-4} t_{cp}$              |
|                                             | 200                                     | $0,048 + 1,67 \cdot 10^{-4} t_{cp}$              |
| Вата стеклянная . . . . .                   | 150                                     | $0,029 + 2,21 \cdot 10^{-4} t_{cp}$              |
|                                             | 200                                     | $0,039 + 2,33 \cdot 10^{-4} t_{cp}$              |
|                                             | 230                                     | $0,062 + 1,39 \cdot 10^{-4} t_{cp}$              |
| Вермикулит обожженный (зернистый) . . . . . | 125                                     | $0,073 + 2,6 \cdot 10^{-4} t_{cp}$               |
|                                             | 150                                     | $0,079 + 2,6 \cdot 10^{-4} t_{cp}$               |
| Вулканический пепел . . . . .               | 945                                     | $0,169 + 6,13 \cdot 10^{-4} t_{cp}$              |
| Диатомит низенский . . . . .                | 300                                     | $0,077 + 2,79 \cdot 10^{-4} t_{cp}$              |
| Диатомовая крошка (обоженная) . . . . .     | 450                                     | $0,079 + 2,6 \cdot 10^{-4} t_{cp}$               |
| Древесные опилки . . . . .                  | 160                                     | $0,055 + 4,44 \cdot 10^{-4} t_{cp}$              |
| Казеиновая шерсть . . . . .                 | 85                                      | $0,044 + 0,93 \cdot 10^{-4} t_{cp}$              |
| Маты и полосы из стекловолна . . . . .      | 180                                     | $0,055 + 1,79 \cdot 10^{-4} t_{cp}$              |
| Очесы хлопчатобумажные . . . . .            | 80                                      | $0,055 + 1,63 \cdot 10^{-4} t_{cp}$              |
| Очесы шерстяные . . . . .                   | 140                                     | $0,32 + 2,6 \cdot 10^{-4} t_{cp}$                |
| Перлит в засыпке . . . . .                  | 200                                     | $0,089 + 2,09 \cdot 10^{-4} t_{cp}$              |
| Пробковая крошка . . . . .                  | 80                                      | $0,035 + 1,86 \cdot 10^{-4} t_{cp}$              |
| Рисовая шелуха . . . . .                    | 180                                     | $0,055 + 1,79 \cdot 10^{-4} t_{cp}$              |
| Совелит . . . . .                           | 230                                     | $0,062 + 1,4 \cdot 10^{-4} t_{cp}$               |
| Торф фрезерный . . . . .                    | 350                                     | $0,071 + 2,09 \cdot 10^{-4} t_{cp}$              |
| Трепел молотый . . . . .                    | 650                                     | $0,105 + 2,3 \cdot 10^{-4} t_{cp}$               |
| Хлопковые остатки . . . . .                 | 320                                     | $0,08 + 2,79 \cdot 10^{-4} t_{cp}$               |

Таблица VI-29

Зависимость коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , Вт/(м·°С), от температуры для теплоизоляционных материалов

| Материал                                                            | Плотность $\rho$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> | Формула для определения<br>$\lambda$ , Вт/(м·°С) |
|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Алюминиевая фольга с воздушными прослойками:                        |                                         |                                                  |
| гладкая . . . . .                                                   | 3                                       | $0,052 + 1,4 \cdot 10^{-4} t_{cp}$               |
| мятая . . . . .                                                     | 5                                       | $0,698 + 1,98 \cdot 10^{-4} t_{cp}$              |
| Асбестовый картон . . . . .                                         | 100 — 1200                              | $0,157 + 1,4 \cdot 10^{-4} t_{cp}$               |
| Асбестовая ткань . . . . .                                          | 600                                     | $0,126 + 2,6 \cdot 10^{-4} t_{cp}$               |
| Асбестовый шнур . . . . .                                           | 800                                     | $0,128 + 1,5 \cdot 10^{-4} t_{cp}$               |
| Асбовермикулитовые изделия . . . . .                                | 250                                     | $0,078 + 1,9 \cdot 10^{-4} t_{cp}$               |
|                                                                     | 300                                     | $0,084 + 2,09 \cdot 10^{-4} t_{cp}$              |
| Асбозурит . . . . .                                                 | 700                                     | $0,162 + 1,69 \cdot 10^{-4} t_{cp}$              |
| Бетоны с заполнителем:                                              |                                         |                                                  |
| диатомит с глиноземистым цементом (4:1 по объему) . . . . .         | 960                                     | $0,202 + 1,7 \cdot 10^{-4} t_{cp}$               |
| вспученная глина с глиноземистым цементом (4:1 по объему) . . . . . | 1400                                    | $0,428 + 1,3 \cdot 10^{-4} t_{cp}$               |
| пористый каолин с глиноземистым цементом (6:1 по объему) . . . . .  | 1050                                    | $0,28 + 1,4 \cdot 10^{-4} t_{cp}$                |
| Войлок строительный шерстяной . . . . .                             | 300                                     | $0,047 + 1,9 \cdot 10^{-4} t_{cp}$               |

| Материал                                                          | Плотность $\rho$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> | Формула для определения<br>$\lambda, \text{Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$ |
|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Вулканит . . . . .                                                | 400                                     | $0,078 + 1,7 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$                                |
| Диатомит нинзенский (порода) . . . . .                            | 680                                     | $0,171 + 2,32 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$                               |
| Диатомовые обожженные изделия . . . . .                           | 500                                     | $0,10 + 2,33 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$                                |
|                                                                   | 600                                     | $0,127 + 2,33 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$                               |
|                                                                   | 700                                     | $0,16 + 3,1 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$                                 |
|                                                                   | 900                                     | $0,28 + 2,4 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$                                 |
| Легковесный кирпич . . . . .                                      | 1000                                    | $0,29 + 2,6 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$                                 |
| Легковес с выгорающими добавками . . . . .                        | 1300                                    | $0,41 + 3,5 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$                                 |
| Минераловатные плиты на связке из<br>крахмала или глины . . . . . | 350                                     | $0,077 + 1,6 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$                                |
|                                                                   | 450                                     | $0,088 + 1,6 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$                                |
| Ньювель . . . . .                                                 | 400—465                                 | $0,087 + 0,64 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$                               |
| Огнеупорный легковес . . . . .                                    | 750                                     | $0,14 + 2,7 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$                                 |
| Пенодиатомовый кирпич . . . . .                                   | 400                                     | $0,08 + 2,2 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$                                 |
| Пенолегковес . . . . .                                            | 540—610                                 | $0,09 + 1,6 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$                                 |
| Пеношамот . . . . .                                               | 600                                     | $0,10 + 1,45 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$                                |
|                                                                   | 950                                     | $0,28 + 1,7 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$                                 |
| Полукислый шамот . . . . .                                        | 1830                                    | $0,66 + 3,7 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$                                 |
| Пробковая плита . . . . .                                         | 250                                     | $0,07 + 1,6 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$                                 |
| Пробка экспанзит . . . . .                                        | 130                                     | $0,05 + 1,4 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$                                 |
| Совелит формованный . . . . .                                     | 400                                     | $0,088 + 0,09 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$                               |
| Торфяные плиты:                                                   |                                         |                                                                          |
| прессованные . . . . .                                            | 200                                     | $0,07 + 1,4 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$                                 |
| формованные . . . . .                                             | 150                                     | $0,06 + 1,4 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$                                 |
| Ультралегковес . . . . .                                          | 350                                     | $0,08 + 3,02 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$                                |
| Химлегковес . . . . .                                             | 740                                     | $0,15 + 1,3 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$                                 |
| Шевелин:                                                          |                                         |                                                                          |
| одинарный . . . . .                                               | 260                                     | $0,052 + 1,5 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$                                |
| двойной . . . . .                                                 | 140                                     | $0,47 + 1,5 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$                                 |
| Шлаковая пробка . . . . .                                         | 350                                     | $0,08 + 2,2 \cdot 10^{-4} t_{\text{ср}}$                                 |
| Шлак доменный . . . . .                                           | 800                                     | 0,150                                                                    |
|                                                                   | 700                                     | 0,130                                                                    |
|                                                                   | 600                                     | 0,115                                                                    |
|                                                                   | 700                                     | 0,125                                                                    |
| Шлак гранулированный . . . . .                                    | 600                                     | 0,110                                                                    |
|                                                                   | 500                                     | 0,095                                                                    |
|                                                                   | 400                                     | 0,08                                                                     |
|                                                                   | 1300                                    | 0,32                                                                     |
| Шлак котельный . . . . .                                          | 1200                                    | 0,29                                                                     |
|                                                                   | 1100                                    | 0,26                                                                     |
|                                                                   | 1000                                    | 0,23                                                                     |
|                                                                   | 900                                     | 0,20                                                                     |

\* При 30°C.

Таблица VI-30

**Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  термоизоляционных материалов**  
в зависимости от влажности и температуры  $t$

| Материал различной плотности $\rho$ ,<br>кг/м <sup>3</sup>                    | Темпе-<br>рату-<br>ра, $t$<br>°C | Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·°C), при<br>влажности $W$ , % |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                                               |                                  | 0                                                                            | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    |
| Асбестоцементные теплоизо-<br>ляционные плиты:<br>$\rho = 410^{*2}$ . . . . . | 65                               | 0,105                                                                        | 0,291 | 0,384 | 0,436 | 0,483 | 0,523 | 0,552 |
|                                                                               | 10                               | 0,093                                                                        | 0,122 | 0,163 | 0,198 | 0,227 | 0,256 | 0,279 |

| Материал различной плотности $\rho$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> | Темпе-<br>рату-<br>ра, $t$ ,<br>°C | Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·°C), при<br>влажности $W$ , % |                |                |                |                |                |                |
|------------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                                                            |                                    | 0                                                                            | 10             | 20             | 30             | 40             | 50             | 60             |
| Газостекло (пеностекло):<br>$\rho=280^{*2}$                | 65<br>5                            | 0,069<br>0,058                                                               | 0,106<br>0,072 | 0,139<br>0,087 | 0,167<br>0,101 | 0,186<br>0,116 | —<br>—         | —<br>—         |
| Диатомовые обожженные из-<br>делия*1:                      |                                    |                                                                              |                |                |                |                |                |                |
| $\rho=1000$                                                | 20—30                              | 0,231                                                                        | 0,319          | 0,392          | 0,459          | —              | —              | —              |
| $\rho=800$                                                 | 20—30                              | 0,174                                                                        | 0,250          | 0,302          | 0,361          | 0,413          | —              | —              |
| $\rho=600$                                                 | 20—30                              | 0,128                                                                        | 0,187          | 0,230          | 0,271          | 0,308          | 0,350          | —              |
| $\rho=400$                                                 | 20—30                              | 0,087                                                                        | 0,126          | 0,157          | 0,183          | 0,206          | 0,227          | 0,251          |
| $\rho=200$                                                 | 20—30                              | 0,064                                                                        | 0,081          | 0,099          | 0,116          | 0,129          | 0,142          | 0,157          |
| Диатомовые обожженные кир-<br>пичи*2:                      |                                    |                                                                              |                |                |                |                |                |                |
| $\rho=740$                                                 | 10                                 | 0,163                                                                        | 0,267          | 0,384          | 0,488          | 0,605          | 0,709          | 0,814          |
| $\rho=660$                                                 | 5                                  | 0,116                                                                        | 0,169          | 0,221          | 0,279          | 0,326          | 0,378          | 0,436          |
| $\rho=550$                                                 | 20                                 | 0,116                                                                        | 0,186          | 0,244          | 0,285          | 0,302          | 0,319          | 0,337          |
| Диатомовая крошка*2:<br>$\rho=510$                         | 0                                  | 0,081                                                                        | 0,110          | 0,139          | 0,160          | 0,186          | 0,211          | 0,238          |
|                                                            | 10                                 | 0,084                                                                        | 0,122          | 0,151          | 0,179          | 0,204          | 0,233          | 0,265          |
|                                                            | 20                                 | 0,086                                                                        | 0,134          | 0,174          | 0,209          | 0,238          | 0,267          | 0,302          |
|                                                            | 30                                 | 0,088                                                                        | 0,163          | 0,215          | 0,259          | 0,297          | 0,331          | 0,361          |
|                                                            | 40                                 | 0,091                                                                        | 0,204          | 0,267          | 0,319          | 0,366          | 0,407          | 0,442          |
|                                                            | 50                                 | 0,093                                                                        | 0,238          | 0,326          | 0,395          | 0,448          | 0,494          | 0,529          |
|                                                            | 60                                 | 0,095                                                                        | 0,291          | 0,399          | 0,488          | 0,561          | 0,616          | 0,662          |
|                                                            | 70                                 | 0,097                                                                        | 0,378          | 0,523          | 0,628          | 0,709          | 0,768          | 0,802          |
| Камышит*1:                                                 |                                    |                                                                              |                |                |                |                |                |                |
| $\rho=400$                                                 | 20—30                              | 0,107                                                                        | 0,133          | 0,154          | 0,172          | 0,187          | 0,204          | 0,221          |
| $\rho=300$                                                 | 20—30                              | 0,093                                                                        | 0,113          | 0,119          | 0,134          | 0,142          | 0,154          | 0,166          |
| $\rho=200$                                                 | 20—30                              | 0,069                                                                        | 0,078          | 0,087          | 0,094          | 0,102          | 0,106          | 0,114          |
| Минеральная вата*1:                                        |                                    |                                                                              |                |                |                |                |                |                |
| $\rho=400$                                                 | 20—30                              | 0,076                                                                        | 0,087          | 0,105          | 0,116          | 0,130          | 0,145          | 0,159          |
| $\rho=300$                                                 | 20—30                              | 0,060                                                                        | 0,069          | 0,078          | 0,087          | 0,093          | 0,100          | 0,107          |
| $\rho=200$                                                 | 20—30                              | 0,046                                                                        | 0,052          | 0,057          | 0,062          | 0,066          | 0,069          | 0,076          |
| Минеральная вата*2:                                        |                                    |                                                                              |                |                |                |                |                |                |
| $\rho=350$                                                 | 20                                 | 0,058                                                                        | 0,081          | 0,100          | 0,119          | 0,136          | 0,155          | 0,172          |
| $\rho=200$                                                 | 20                                 | 0,047                                                                        | 0,053          | 0,059          | 0,065          | 0,072          | 0,078          | 0,084          |
| $\rho=120$                                                 | 20                                 | 0,035                                                                        | 0,037          | 0,042          | 0,044          | 0,047          | 0,049          | 0,052          |
| Пенобетон*1:                                               |                                    |                                                                              |                |                |                |                |                |                |
| $\rho=1200$                                                | 20—30                              | 0,319                                                                        | 0,433          | 0,535          | —              | —              | —              | —              |
| $\rho=1100$                                                | 20—30                              | 0,286                                                                        | 0,389          | 0,485          | 0,569          | —              | —              | —              |
| $\rho=1000$                                                | 20—30                              | 0,254                                                                        | 0,352          | 0,439          | 0,516          | —              | —              | —              |
| $\rho=900$                                                 | 20—30                              | 0,221                                                                        | 0,308          | 0,392          | 0,462          | 0,516          | —              | —              |
| $\rho=800$                                                 | 20—30                              | 0,192                                                                        | 0,272          | 0,343          | 0,409          | 0,469          | —              | —              |
| $\rho=700$                                                 | 20—30                              | 0,169                                                                        | 0,241          | 0,308          | 0,366          | 0,419          | 0,454          | —              |
| $\rho=600$                                                 | 20—30                              | 0,149                                                                        | 0,207          | 0,262          | 0,309          | 0,355          | 0,397          | —              |
| $\rho=500$                                                 | 20—30                              | 0,134                                                                        | 0,180          | 0,219          | 0,256          | 0,286          | 0,316          | 0,347          |
| $\rho=400$                                                 | 20—30                              | 0,119                                                                        | 0,151          | 0,183          | 0,215          | 0,241          | 0,267          | 0,291          |
| $\rho=300$                                                 | 20—30                              | 0,107                                                                        | 0,134          | 0,163          | 0,179          | 0,198          | 0,215          | 0,233          |
| Пенобетон автоклавный:                                     |                                    |                                                                              |                |                |                |                |                |                |
| $\rho=460$                                                 | 10                                 | 0,097                                                                        | 0,139          | 0,177          | 0,207          | 0,233          | 0,250          | 0,267          |
|                                                            | 20                                 | 0,099                                                                        | 0,151          | 0,192          | 0,227          | 0,256          | 0,277          | 0,300          |
|                                                            | 30                                 | 0,101                                                                        | 0,165          | 0,216          | 0,258          | 0,291          | 0,314          | 0,335          |
|                                                            | 40                                 | 0,104                                                                        | 0,189          | 0,254          | 0,300          | 0,339          | 0,372          | 0,398          |
|                                                            | 50                                 | 0,106                                                                        | 0,216          | 0,291          | 0,355          | 0,407          | 0,449          | 0,484          |
|                                                            | 60                                 | 0,107                                                                        | 0,245          | 0,336          | 0,409          | 0,472          | 0,530          | 0,579          |
|                                                            | 70                                 | 0,110                                                                        | 0,286          | 0,397          | 0,488          | 0,586          | 0,634          | 0,695          |
| То же*2:                                                   |                                    |                                                                              |                |                |                |                |                |                |
| $\rho=280$                                                 | 65<br>5                            | 0,087<br>0,058                                                               | 0,137<br>0,069 | 0,186<br>0,088 | 0,241<br>0,093 | 0,291<br>0,105 | 0,343<br>0,116 | 0,395<br>0,128 |
| Песок*2:                                                   |                                    |                                                                              |                |                |                |                |                |                |
| $\rho=1380$                                                | 0—40                               | 0,349                                                                        | 0,663          | 0,930          | —              | —              | —              | —              |
| $\rho=1640$                                                | 0—40                               | 0,372                                                                        | 0,965          | 1,232          | —              | —              | —              | —              |

| Материал различной плотности $\rho$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> | Темпе-<br>рату-<br>ра, $t$ ,<br>°C | Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·°C) при<br>влажности $W$ , % |       |       |       |       |       |       |
|------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                            |                                    | 0                                                                           | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    |
| Соломит*1:<br>$\rho=150$                                   | 20—30                              | 0,058                                                                       | 0,063 | 0,069 | 0,076 | 0,081 | 0,087 | 0,093 |
| Стекланная вата*1:<br>$\rho=200$                           | 20—30                              | 0,047                                                                       | 0,052 | 0,059 | 0,064 | 0,069 | 0,074 | 0,079 |
| $\rho=150$                                                 | 20—30                              | 0,041                                                                       | 0,044 | 0,050 | 0,053 | 0,057 | 0,060 | 0,064 |
| Шлак гранулированный*1:<br>$\rho=700$                      | 20—30                              | 0,145                                                                       | 0,198 | 0,247 | 0,288 | 0,326 | 0,361 | —     |
| $\rho=600$                                                 | 20—30                              | 0,128                                                                       | 0,174 | 0,211 | 0,245 | 0,279 | 0,314 | —     |
| $\rho=500$                                                 | 20—30                              | 0,110                                                                       | 0,151 | 0,180 | 0,209 | 0,238 | 0,267 | 0,297 |
| $\rho=400$                                                 | 20—30                              | 0,093                                                                       | 0,131 | 0,156 | 0,180 | 0,204 | 0,224 | 0,244 |
| Шлак доменный*1:<br>$\rho=800$                             | 20—30                              | 0,174                                                                       | 0,247 | 0,302 | 0,351 | 0,392 | 0,424 | —     |
| $\rho=700$                                                 | 20—30                              | 0,151                                                                       | 0,211 | 0,262 | 0,302 | 0,338 | 0,369 | —     |
| $\rho=600$                                                 | 20—30                              | 0,134                                                                       | 0,183 | 0,228 | 0,267 | 0,302 | 0,337 | —     |
| Шлак котельный*1:<br>$\rho=1300$                           | 20—30                              | 0,372                                                                       | 0,505 | 0,622 | —     | —     | —     | —     |
| $\rho=1200$                                                | 20—30                              | 0,337                                                                       | 0,454 | 0,555 | —     | —     | —     | —     |
| $\rho=1100$                                                | 20—30                              | 0,302                                                                       | 0,407 | 0,500 | 0,582 | —     | —     | —     |
| $\rho=1000$                                                | 20—30                              | 0,267                                                                       | 0,361 | 0,435 | 0,506 | —     | —     | —     |
| $\rho=900$                                                 | 20—30                              | 0,233                                                                       | 0,319 | 0,388 | 0,436 | —     | —     | —     |
| Торфяные плиты*1:<br>$\rho=300$                            | 20—30                              | 0,067                                                                       | 0,087 | 0,104 | 0,119 | 0,135 | 0,152 | 0,167 |
| $\rho=250$                                                 | 20—30                              | 0,061                                                                       | 0,073 | 0,087 | 0,102 | 0,114 | 0,126 | 0,137 |
| $\rho=200$                                                 | 20—30                              | 0,052                                                                       | 0,064 | 0,076 | 0,086 | 0,094 | 0,105 | 0,114 |
| $\rho=150$                                                 | 20—30                              | 0,045                                                                       | 0,055 | 0,060 | 0,069 | 0,076 | 0,081 | 0,087 |
| Торф сфагнум*1:<br>$\rho=400$                              | 20—30                              | 0,128                                                                       | 0,147 | 0,171 | 0,192 | 0,209 | 0,227 | 0,244 |
| $\rho=300$                                                 | 20—30                              | 0,107                                                                       | 0,119 | 0,135 | 0,147 | 0,158 | 0,171 | 0,184 |
| $\rho=200$                                                 | 20—30                              | 0,087                                                                       | 0,098 | 0,107 | 0,116 | 0,123 | 0,128 | 0,135 |
| $\rho=100$                                                 | 20—30                              | 0,069                                                                       | 0,076 | 0,080 | 0,086 | 0,088 | 0,091 | 0,094 |

\*1 Коэффициенты теплопроводности определены при стационарном режиме. \*2 То же, при нестационарном (регулярном) режиме.

Таблица VI-31

Теплоемкость  $c$ , кДж/(кг·°C), некоторых термоизоляционных материалов при 20°C

| Материал                      | $c$ ,<br>кДж<br>(кг·°C) | Материал         | $c$ ,<br>кДж<br>(кг·°C) |
|-------------------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|
| Асбест (волокно)              | 0,837                   | Минеральная вата | 0,921                   |
| Асбест (картон, шнур и т. п.) | 0,837                   | Пенобетон        | 0,837                   |
| Асбоцементные плиты           | 0,837                   | Соломит          | 1,507                   |
| Войлок (шерстяной)            | 1,884                   | Стекловолокно    | 0,837                   |
| Диатом                        | 0,837                   | Торфяные плиты   | 2,093                   |
| Зола и шлаки                  | 0,754                   | Торф сфагнум     | 2,093                   |
| Камышит                       | 1,507                   | Фибролит         | 2,303                   |

## ТОПЛИВО И ЕГО СЖИГАНИЕ

В настоящем разделе приведены справочные материалы по газообразному, жидкому и твердому топливам. Кроме чисто теплотехнических данных, характеризующих количество образующихся продуктов сгорания при сжигании горючих компонентов, количества потребного воздуха и пр.; приведены таблицы теплофизических свойств (теплоемкость, энтальпия, вязкость и др.), относящихся непосредственно к топливу и продуктам сгорания. Характеристики теплофизических свойств химических элементов, окислов, газов и сплавов приведены в разделе первом.

### Основные понятия и обозначения

- $A^c$  — зольность сухой массы топлива, %;
- $B = V_{\text{сух}}/V$  — отношение объемов сухих и влажных продуктов сгорания;
- $B$  — объем газообразного топлива,  $\text{м}^3$ ,  $L^3$  либо расход топлива,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $L^3 T^{-1}$ ;
- $\text{CO}, \text{H}_2, \text{C} \dots$  — содержание компонентов, %;
- $C_T$  — содержание углерода в горючей массе топлива, %;
- $(\text{CO}_2)_k^c$  — содержание углекислоты карбонатов в сухой массе топлива, %;
- $G$  — масса; расход топлива по массе  $G_B$ ; воздуха  $G_L$ ; продуктов сгорания  $G_V$ , кг, т; М;
- $G_{v4,2}$  — масса продуктов сгорания, образующихся при сжигании топлива, эквивалентного 4,2 МДж тепла; в кг на 4,2 МДж тепла; М;
- $\text{Hr}$  — содержание водорода в горючей массе топлива, %;
- $i_{v\text{сух}}$  — энтальпия, низшая теплота сгорания топлива, отнесенная к 1  $\text{м}^3$  сухих продуктов сгорания,  $\text{кДж}/\text{м}^3$ ,  $L^{-1}MT^{-2}$ ;
- $i^G$  — энтальпия 1 кг влажных продуктов сгорания топлива,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ,  $L^2T^{-2}$ ;
- $i_v$  — энтальпия 1  $\text{м}^3$  влажных продуктов сжигания топлива,  $\text{кДж}/\text{м}^3$ . Низшая теплота сгорания топлива, отнесенная к 1  $\text{м}^3$  продуктов сгорания,  $\text{кДж}/\text{м}^3$ ;  $L^{-1}MT^{-2}$ ;
- $K_{\text{л.о}}$  — относительный лабораторный коэффициент размоло-способности топлива по методике ВТИ, который характеризует отношение расходов энергии при размолу эталонного и испытуемого топлива в воздушно-сухом состоянии и измельчения их от одинаковой крупности до одной и той же тонкости. В качестве эталонного топлива принят донецкий антрацитовый штыб;
- $L_{4,2}$  — объем воздуха,  $\text{м}^3$ , теоретически необходимый для сжигания объема или массы топлива, содержащего 4,2 МДж тепла,  $\text{м}^3/4,2 \text{ МДж}$  ( $1 \text{ м}^3/4185,5 \text{ кДж}$  или  $1 \text{ м}^3/1000 \text{ ккал}$ );  $L^3$ ;

- $L_{\text{теор}}^{\text{сух}}$  — теоретический расход сухого воздуха,  $\text{м}^3$ ;  $L^3$ ;  
 $L_a$  — действительный объем воздуха,  $\text{м}^3$ , подаваемого для сжигания топлива,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $L^3$ ;  
 $L_{\text{теор}}$  — объем воздуха,  $\text{м}^3$ , теоретически необходимый для сжигания 1  $\text{м}^3$  (кг) топлива,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ,  $\text{м}^3/\text{кг}$ ,  $L^3$ ;  $L^3\text{М}^{-1}$ ;  
 $L$  — объем воздуха,  $\text{м}^3$ ,  $L^3$ ; либо расход воздуха,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $\text{м}^3$  в единицу времени  $L^3T^{-1}$ ;  
 $M$  — молекулярная масса,  $\text{кг}/\text{моль}$ ;  $M$ ;  
 $Q_v$  — высшая теплота сгорания топлива с учетом тепла, выделившегося при конденсации водяных паров продуктов сгорания,  $\text{кДж}/\text{моль}$ ,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ,  $\text{кДж}/\text{м}^3$  для газов;  $L^2T^{-2}$ ;  $L^{-1}MT^{-2}$ ;  
 $Q_n$  — низшая теплота сгорания топлива с учетом расхода тепла на образование водяного пара при сгорании водорода топлива и испарение содержащейся в топливе влаги,  $\text{кДж}/\text{м}^3$ ,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ,  $L^{-1}MT^{-2}$ ;  $L^2T^{-2}$ ;  
 $Q_n^{\text{мас}}$  — низшая теплота сгорания топлива, отнесенная к единице массы топлива,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;  $L^2T^{-2}$ ;  
 $Q_n^{\text{об}}$  — теплота реакции горения горючих газов, отнесенная к единице объема,  $\text{кДж}/\text{м}^3$ ;  $L^{-1}MT^{-2}$ ;  
 $Q_n^c$  — низшая теплота сгорания сухого топлива,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ,  $L^2T^{-2}$ ;  $\text{кДж}/\text{м}^3$ ;  $L^{-1}MT^{-2}$ ;  
 $Q_0^r$  — теплота сгорания в калориметрической бомбе горючей массы топлива,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;  $L^2T^{-2}$ ;  
 $Q_n^r$  — низшая теплота сгорания в бомбе горючей массы топлива,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;  $L^2T^{-2}$ ;  
 $Q_n^p$  — низшая теплота сгорания рабочего топлива,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;  $L^2T^{-2}$ ;  
 $q_{\text{CO}}$ ,  $q_{\text{H}_2}$  и др. — теплота реакции горения горючих газов,  $\text{кДж}/\text{м}^3$ ;  $L^{-1}MT^{-2}$ ;  
 $R_{\text{оф.ш}}$  — универсальная газовая постоянная в нормальных физических условиях ( $t=0^\circ\text{C}$ ,  $p=101325 \text{ Н}/\text{м}^2$ ) по кислородной физической шкале.  $R_{\text{оф.ш}}=(8316,96 \pm \pm 0,34) \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $L^2T^{-2}\theta^{-1}$ ;  
 $\text{RO}_{2\text{max}}$  — максимально возможное содержание  $\text{RO}_2(\text{CO}_2+\text{SO}_2)$  в сухих продуктах сгорания сернистого топлива (полнота сгорания в теоретически необходимом количестве воздуха), %;  
 $S_{\text{об}}^c$  — содержание общей серы в сухой массе топлива, %;  
 $S_c^c$  — то же, серы сульфатной, %;  
 $S_k^c$  — то же, серы колчеданной, %;  
 $S_k^r$  — содержание серы колчеданной в горючей массе топлива, %;  
 $S_{\text{ор}}^r$  — то же, серы органической, %;  
 $t_1$  — температура начала деформации золы в полувосстановительной газовой среде,  $^\circ\text{C}$ ;  $\theta$ ;  
 $t_2$  — температура размягчения золы в полувосстановительной газовой среде,  $^\circ\text{C}$ ;  $\theta$ ;  
 $t_3$  — температура начала жидкоплавкого состояния золы в полувосстановительной газовой среде,  $^\circ\text{C}$ ;  $\theta$ ;  
 $t_{\text{всп}}$  — температура вспышки топлива,  $^\circ\text{C}$ ;  $\theta$ ;  
 $t_{\text{ж}}$  — жаропроизводительность (нормальная калориметрическая температура), развиваемая при полном сго-

рании топлива в теоретически необходимом объеме воздуха, содержащего 1% (вес.) влаги, без учета каких-либо потерь тепла (температуры топлива и воздуха 0°C), °C;  $\theta$ ;

$t_{ж}$  — жаропроизводительность топлива (калориметрическая температура сжигания топлива), развиваемая при полном сгорании топлива в теоретически необходимом объеме сухого воздуха, без учета каких-либо потерь тепла (температура топлива и воздуха, 0°C); °C;  $\theta$ ;

$t_{теор}$  — теоретическая температура горения; определяется с учетом диссоциации продуктов сгорания при высокой температуре;

$t_{к}$  — жаропроизводительность топлива с учетом подогрева газа и воздуха, °C;  $\theta$ ;

$V_L$  — избыток воздуха в продуктах сгорания, проценты к объему всех продуктов сгорания, %;

$V_{ог}^r$  — объемный выход летучих веществ, см<sup>3</sup>/г;  $L^3M^{-1}$ ;

$V^r$  — выход летучих веществ на горючую массу, %;

$\Delta V = V - L$  — разность между объемом продуктов сгорания и количеством израсходованного воздуха, м<sup>3</sup>;  $L^3$ ;

$V_a$  — объем продуктов сгорания, образующихся при сжигании топлива (количество воздуха отличается от теоретического в соответствии с  $\alpha$ ), м<sup>3</sup>;  $L^3$ ;

$V_{4,2}$  — объем продуктов сгорания, м<sup>3</sup>, образующихся при сжигании объема или массы топлива, эквивалентных 4185,5 кДж тепла (или 1000 ккал), 1 м<sup>3</sup>/4,2 (1 м<sup>3</sup>/4,1855 МДж или м<sup>3</sup>/1000 ккал);  $L^3$ ;

$V_{сух}$  — объем сухих продуктов сгорания, м<sup>3</sup>;  $L^3$ ;

$V_{теор}$  — объем влажных продуктов сгорания при нормальных условиях, образующихся при сжигании 1 м<sup>3</sup> (кг) топлива с теоретически необходимым количеством воздуха, м<sup>3</sup>;  $L^3$ ;

$V$  — объем продуктов сгорания, м<sup>3</sup>, либо расход продуктов сгорания, м<sup>3</sup>/ч; м<sup>3</sup> в единицу времени,  $L^3$ ;  $L^3T^{-1}$ ;

$V_{H_2O}$  — объем водяных паров в продуктах сгорания 1 кг топлива или 1 м<sup>3</sup> газа, м<sup>3</sup>/кг, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $L^3M^{-1}$ ;

$W^a$  — содержание влаги в аналитической пробе, %;

$W^r$  — то же, в рабочем топливе, %;

$y$  — толщина пластического слоя, мм;  $L$ ;

$\alpha$  — коэффициент расхода воздуха — отношение количества подаваемого воздуха  $L_a$  к теоретически необходимому для сжигания топлива  $L_{теор}$ ;

$\rho_0$  — плотность газа при нормальных условиях, кг/м<sup>3</sup>;  $L^{-3}M$ ;

$\rho_{пр.г}$  — плотность продуктов сгорания топлива при нормальных условиях, кг/м<sup>3</sup>;  $L^{-3}M$ ;

$\eta$  — коэффициент использования тепла топлива (КИТ).

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОПЛИВА

Из существующих топлив в настоящее время наибольшее распространение получили топлива: газообразное, в особенности природный и смесь коксового и доменного газов, а также жидкое. Твердое топливо в печах сейчас применяют главным образом в виде пылевых взвесей и для получения генераторного газа. Поэтому в гл. VII даны лишь основные свойства некоторых видов твердого топлива.

### ГАЗООБРАЗНЫЕ ТОПЛИВА

Таблица VII-1

Характеристика топлив и их составляющих

| Название вещества, химическая формула       | Молекулярная масса $M$ , кг/моль | Плотность $\rho$ , кг/м³ | Газовая постоянная $R$ , Дж/(кг·°C) | Теплота сгорания           |                            |                             |                             |
|---------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                                             |                                  |                          |                                     | $Q_{\text{в}}^{\text{об}}$ | $Q_{\text{н}}^{\text{об}}$ | $Q_{\text{в}}^{\text{мас}}$ | $Q_{\text{н}}^{\text{мас}}$ |
|                                             |                                  |                          |                                     | кДж/м³                     | кДж/кг                     |                             |                             |
| Углерод при сгорании до CO (C)              | 12,01                            | —                        | —                                   | —                          | ✓                          | 9295                        | 9295                        |
| Углерод при сгорании до CO <sub>2</sub> (C) | 12,01                            | —                        | —                                   | —                          | —                          | 32908                       | 32908                       |
| Оксид углерода (CO)                         | 28,01                            | 1,25                     | 297                                 | 12644                      | 12644                      | 10132                       | 10132                       |
| Водород (H <sub>2</sub> )                   | 2,016                            | 0,09                     | 412                                 | 12770                      | 10760                      | 141974                      | 119617                      |
| Метан (CH <sub>4</sub> )                    | 16,04                            | 0,717                    | 518                                 | 39853                      | 35797                      | 56103                       | 49404                       |
| Этан (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )       | 30,07                            | 1,34                     | 276                                 | 70422                      | 64351                      | 51958                       | 47436                       |
| Пропан (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )     | 44,09                            | 1,96                     | 187                                 | 101823                     | 93573                      | 50409                       | 46348                       |
| Бутан (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )     | 58,12                            | 2,59                     | 143                                 | 134019                     | 123552                     | 49572                       | 45720                       |
| Пентен (C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> )    | 70,13                            | 3,13                     | —                                   | 150723                     | 140928                     | 48575                       | 45025                       |
| Пентан (C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> )    | 72,14                            | 3,22                     | 115                                 | 148213                     | 137143                     | 48358                       | 44661                       |
| Бензол (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )     | 78,11                            | 3,48                     | —                                   | 146287                     | 140383                     | 42035                       | 40340                       |
| Этилен (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )     | 28,05                            | 1,25                     | 296                                 | 64016                      | 14320                      | 50786                       | 47562                       |
| Пропилен (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> )   | 42,08                            | 1,88                     | 198                                 | 94370                      | 88216                      | 49279                       | 46055                       |
| Бутилен (C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> )    | 56,10                            | 2,50                     | 148                                 | 114509                     | 107015                     | 48692                       | 45469                       |
| Ацетилен (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )   | 26,03                            | 1,16                     | 320                                 | 58992                      | 56940                      | 50367                       | 48651                       |
| Сероводород (H <sub>2</sub> S)              | 34,07                            | 1,52                     | 242                                 | 25707                      | 23697                      | 16705                       | 15407                       |
| Сера (S)                                    | 32,06                            | —                        | —                                   | —                          | —                          | 9261                        | 9261                        |

| Название вещества, химическая формула     | Жаропроизводительность $t_{ж}^{\circ}$ | Необходимый объем воздуха $L_{теор}^{\text{м}^3}$ | Количество продуктов сгорания, $\text{м}^3$ , образующихся при сжигании $1 \text{ м}^3$ горючего |                      |              |        | Необходимый объем воздуха $\text{м}^3$ , $p$ |
|-------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|--------------|--------|----------------------------------------------|
|                                           |                                        |                                                   | $\text{CO}_2$                                                                                    | $\text{H}_2\text{O}$ | $\text{N}_2$ | всего  |                                              |
| Углерод при сгорании до $\text{CO}$ (C)   | —                                      | —                                                 | —                                                                                                | —                    | —            | —      | 4,455                                        |
| Углерод при сгорании до $\text{CO}_2$ (C) | 2190                                   | —                                                 | —                                                                                                | —                    | —            | —      | 8,9                                          |
| Окись углерода (CO)                       | 2378                                   | 2,386                                             | 1,00                                                                                             | —                    | 1,886        | 2,880  | 1,909                                        |
| Водород ( $\text{H}_2$ )                  | 2240                                   | 2,386                                             | —                                                                                                | 1,00                 | 1,886        | 2,886  | 26,467                                       |
| Метан ( $\text{CH}_4$ )                   | 2042                                   | 9,542                                             | 1,0                                                                                              | 2,0                  | 7,542        | 10,542 | 13,333                                       |
| Этан ( $\text{C}_2\text{H}_6$ )           | 2051                                   | 16,647                                            | 2,0                                                                                              | 3,0                  | 13,17        | 18,17  | 12,95                                        |
| Пропан ( $\text{C}_3\text{H}_8$ )         | 2107                                   | 23,86                                             | 3,0                                                                                              | 4,0                  | 18,82        | 25,82  | 12,43                                        |
| Бутан ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ )       | 2117                                   | 30,97                                             | 4,0                                                                                              | 5,0                  | 24,47        | 33,47  | 11,48                                        |
| Пентен ( $\text{C}_5\text{H}_{10}$ )      | 2189                                   | 35,70                                             | —                                                                                                | —                    | —            | 38,20  | —                                            |
| Пентан ( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ )      | 2120                                   | 38,11                                             | 5,0                                                                                              | 6,0                  | —            | 41,1   | 12,49                                        |
| Бензол ( $\text{C}_6\text{H}_6$ )         | 2258                                   | 35,70                                             | —                                                                                                | —                    | 30,11        | 37,20  | —                                            |
| Этилен ( $\text{C}_2\text{H}_4$ )         | 2285                                   | 14,31                                             | 2,0                                                                                              | 2,0                  | 11,31        | 15,31  | 11,44                                        |
| Пропилен ( $\text{C}_3\text{H}_6$ )       | 2318                                   | 21,43                                             | 3,0                                                                                              | 3,0                  | 16,93        | 22,93  | 11,49                                        |
| Бутилен ( $\text{C}_4\text{H}_8$ )        | 2210                                   | 28,58                                             | 4,0                                                                                              | 4,0                  | 22,58        | 30,58  | 12,04                                        |
| Ацетилен ( $\text{C}_2\text{H}_2$ )       | 2620                                   | 11,93                                             | 2,0                                                                                              | 1,0                  | 9,43         | 12,43  | 10,71                                        |
| Сероводород ( $\text{H}_2\text{S}$ )      | —                                      | 7,14                                              | $\text{SO}_2$                                                                                    | 1,0                  | 5,64         | 7,64   | 4,88                                         |
| Сера (S)                                  | —                                      | —                                                 | —                                                                                                | —                    | —            | —      | 3,33                                         |

Продолжение табл. VII-1

| Название вещества, химическая формула     | Количество продуктов сгорания, $\text{м}^3$ , образующихся при сжигании $1 \text{ кг}$ горючего |                      |              |       | Коэффициент вязкости $\eta$ , $\text{мкН} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ | Кинематическая вязкость $\nu \cdot 10^4$ , $\text{см}^2/\text{с}$ |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|--------------|-------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
|                                           | $\text{CO}_2$                                                                                   | $\text{H}_2\text{O}$ | $\text{N}_2$ | всего |                                                                      |                                                                   |
| Углерод при сгорании до $\text{CO}$ (C)   | 1,87 $\text{CO}$                                                                                | —                    | 3,52         | 5,39  | —                                                                    | —                                                                 |
| Углерод при сгорании до $\text{CO}_2$ (C) | 1,87                                                                                            | —                    | 7,04         | 8,9   | —                                                                    | —                                                                 |
| Окись углерода (CO)                       | 0,800                                                                                           | —                    | 1,509        | 2,309 | 17,26                                                                | 13,01                                                             |
| Водород ( $\text{H}_2$ )                  | —                                                                                               | 11,09                | 20,9         | 32,0  | 8,73                                                                 | 97,01                                                             |
| Метан ( $\text{CH}_4$ )                   | 1,397                                                                                           | 2,795                | 10,54        | 14,73 | 10,30                                                                | 14,36                                                             |
| Этан ( $\text{C}_2\text{H}_6$ )           | 1,55                                                                                            | 2,33                 | 10,23        | 14,11 | 8,63                                                                 | 6,43                                                              |
| Пропан ( $\text{C}_3\text{H}_8$ )         | 1,56                                                                                            | 2,08                 | 9,82         | 13,47 | —                                                                    | —                                                                 |
| Бутан ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ )       | 1,48                                                                                            | 1,85                 | 9,07         | 12,41 | 7,94                                                                 | 3,06                                                              |
| Пентен ( $\text{C}_5\text{H}_{10}$ )      | —                                                                                               | —                    | —            | —     | —                                                                    | —                                                                 |
| Пентан ( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ )      | 1,64                                                                                            | 1,87                 | 9,87         | 13,47 | —                                                                    | —                                                                 |
| Бензол ( $\text{C}_6\text{H}_6$ )         | —                                                                                               | —                    | —            | —     | —                                                                    | —                                                                 |
| Этилен ( $\text{C}_2\text{H}_4$ )         | 1,599                                                                                           | 1,59                 | 9,04         | 12,24 | 9,51                                                                 | 7,61                                                              |
| Пропилен ( $\text{C}_3\text{H}_6$ )       | 1,56                                                                                            | 1,56                 | 8,84         | 11,98 | —                                                                    | —                                                                 |
| Бутилен ( $\text{C}_4\text{H}_8$ )        | 1,68                                                                                            | 1,68                 | 9,51         | 12,88 | —                                                                    | —                                                                 |
| Ацетилен ( $\text{C}_2\text{H}_2$ )       | 1,79                                                                                            | 0,89                 | 8,47         | 11,16 | 0,41                                                                 | 8,10                                                              |
| Сероводород ( $\text{H}_2\text{S}$ )      | 0,68 $\text{SO}_2$                                                                              | 0,68                 | 3,36         | 5,23  | 11,77                                                                | 7,74                                                              |
| Сера (S)                                  | 0,7 $\text{SO}_2$                                                                               | —                    | 2,64         | 3,34  | —                                                                    | —                                                                 |

Таблица VII-2

## Некоторые характеристики горючих газов

| Название газа, химическая формула    | Температура сжигания при $p=101325 \text{ Н/м}^2$ , °C | Объем сухих продуктов сгорания на 1 м <sup>3</sup> газа $V_{\text{сух}}$ , м <sup>3</sup> | Удельная энтальпия, кДж/м <sup>3</sup> |                   | Отношение объемов сухих и влажных продуктов сгорания $B$ | Максимальное содержание $\text{CO}_2$ при сжигании газа в воздухе $\text{CO}_{\text{max}}$ , % |
|--------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                      |                                                        |                                                                                           | $i_v$                                  | $i_{\text{всух}}$ |                                                          |                                                                                                |
| Оксид углерода ( $\text{CO}$ )       | —                                                      | 2,88                                                                                      | 4375                                   | 4375              | 1,00                                                     | 34,7                                                                                           |
| Водород ( $\text{H}_2$ )             | —                                                      | 1,88                                                                                      | 3747                                   | 5736              | 0,65                                                     | —                                                                                              |
| Метан ( $\text{CH}_4$ )              | —162                                                   | 8,52                                                                                      | 3391                                   | 4187              | 0,81                                                     | 11,8                                                                                           |
| Этан ( $\text{C}_2\text{H}_6$ )      | —89                                                    | 15,16                                                                                     | 3517                                   | 4187              | 0,84                                                     | 13,2                                                                                           |
| Пропан ( $\text{C}_3\text{H}_8$ )    | —42                                                    | 21,80                                                                                     | 3538                                   | 4187              | 0,84                                                     | 13,8                                                                                           |
| Бутан ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ )  | —1                                                     | 28,44                                                                                     | 3559                                   | 4187              | 0,85                                                     | 14,0                                                                                           |
| Пентан ( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ) | +36                                                    | 35,08                                                                                     | 3559                                   | 4187              | 0,85                                                     | 14,2                                                                                           |
| Этилен ( $\text{C}_2\text{H}_4$ )    | —104                                                   | 13,28                                                                                     | 3873                                   | 4459              | 0,87                                                     | 15,0                                                                                           |
| Пропилен ( $\text{C}_3\text{H}_6$ )  | —48                                                    | 19,92                                                                                     | 3768                                   | 4312              | 0,87                                                     | 15,0                                                                                           |
| Пентен ( $\text{C}_5\text{H}_{10}$ ) | +30                                                    | 33,20                                                                                     | 3705                                   | 4250              | 0,87                                                     | 15,0                                                                                           |
| Бензол ( $\text{C}_6\text{H}_6$ )    | +80                                                    | 34,20                                                                                     | 3768                                   | 4124              | 0,92                                                     | 17,5                                                                                           |
| Ацетилен ( $\text{C}_2\text{H}_2$ )  | —                                                      | 11,40                                                                                     | 4522                                   | 4898              | 0,92                                                     | 17,5                                                                                           |
| Бутилен ( $\text{C}_4\text{H}_8$ )   | —6                                                     | 26,56                                                                                     | 3726                                   | 4271              | 0,87                                                     | 15,0                                                                                           |

Таблица VII-3

Средние теплоемкости  $c_{\text{ср}}$ , кДж/(м<sup>3</sup>·°C), и удельные энтальпии  $i$ , кДж/м<sup>3</sup>, продуктов сгорания доменного газа [ $Q_{\text{H}}^{\text{P}}=3977-4396 \text{ кДж/м}^3$  (950—1050 ккал/м<sup>3</sup>)]

| Избыток воздуха, % | Значения $c_{\text{ср}}$ и $i$ при температуре, °C |              |              |              |               |
|--------------------|----------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
|                    | 0                                                  | 200          | 400          | 600          | 800           |
| 0                  | 1,369; 0                                           | 1,407; 281,4 | 1,445; 577,8 | 1,482; 889,3 | 1,520; 1215,8 |
| 20                 | 1,365; 0                                           | 1,403; 280,5 | 1,440; 576,1 | 1,478; 886,8 | 1,516; 1212,5 |
| 40                 | 1,356; 0                                           | 1,390; 277,2 | 1,428; 571,1 | 1,467; 876,7 | 1,499; 1199,1 |
| 100                | 1,348; 0                                           | 1,382; 276,3 | 1,451; 566,1 | 1,449; 869,2 | 1,482; 1185,7 |

Продолжение табл. VII-3

| Избыток воздуха, % | Значения $c_{\text{ср}}$ и $i$ при температуре, °C |               |               |               |
|--------------------|----------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
|                    | 1000                                               | 1200          | 1400          | 1600          |
| 0                  | 1,557; 1557,5                                      | 1,599; 1919,2 | 1,637; 2291,8 | 1,674; 2679,6 |
| 20                 | 1,553; 1553,3                                      | 1,591; 1909,2 | 1,629; 2280,1 | 1,666; 2666,2 |
| 40                 | 1,532; 1532,4                                      | 1,570; 1884,1 | 1,604; 2245,0 | 1,641; 2626,0 |
| 100                | 1,516; 1515,6                                      | 1,549; 1858,9 | 1,583; 2215,6 | 1,616; 2585,8 |

Продолжение табл. VII-3

| Избыток воздуха, % | Значения $c_{\text{ср}}$ и $i$ при температуре, °C |               |               |               |
|--------------------|----------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
|                    | 1800                                               | 2000          | 2200          | 2500          |
| 0                  | 1,712; 3082,3                                      | 1,754; 3508,5 | 1,792; 3942,3 | 1,851; 4626,4 |
| 20                 | 1,704; 3067,2                                      | 1,742; 3483,4 | 1,779; 3914,6 | 1,838; 4595,0 |
| 40                 | 1,675; 3014,5                                      | 1,712; 3424,8 | 1,746; 3841,0 | 1,800; 4500,8 |
| 100                | 1,650; 2969,3                                      | 1,683; 3366,2 | 1,717; 3776,5 | 1,767; 4417,1 |

Таблица VII-4

Средние теплоемкости  $c_{\text{ср}}$ , кДж/(м<sup>3</sup>·°С), и удельные энтальпии  $i$ , кДж/м<sup>3</sup>, продуктов сгорания смеси ( $Q_{\text{H}}^{\text{P}} = 8370$  кДж/м<sup>3</sup> коксового и доменного газов с теплотой сгорания коксового газа (30,3%)  $Q_{\text{H}}^{\text{P}} = 18000$  кДж/м<sup>3</sup> и доменного газа (69,7%)  $Q_{\text{H}}^{\text{P}} = 4200$  кДж/м<sup>3</sup>

| Избыток воздуха, % | Значения $c_{\text{ср}}$ и $i$ при температуре, °С |              |              |              |               |
|--------------------|----------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
|                    | 0                                                  | 200          | 400          | 600          | 800           |
| 0                  | 1,365; 0                                           | 1,398; 279,7 | 1,432; 572,8 | 1,469; 881,7 | 1,503; 1202,4 |
| 20                 | 1,361; 0                                           | 1,394; 278,8 | 1,428; 571,1 | 1,461; 876,7 | 1,495; 1195,8 |
| 40                 | 1,352; 0                                           | 1,382; 276,3 | 1,415; 566,1 | 1,444; 866,7 | 1,474; 1179,0 |
| 100                | 1,336; 0                                           | 1,365; 279,9 | 1,394; 557,7 | 1,424; 854,1 | 1,453; 1162,3 |

Продолжение табл. VII-4

| Избыток воздуха, % | Значения $c_{\text{ср}}$ и $i$ при температуре, °С |               |               |               |
|--------------------|----------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
|                    | 1000                                               | 1200          | 1400          | 1600          |
| 0                  | 1,537; 1536,6                                      | 1,570; 1884,1 | 1,608; 2250,8 | 1,641; 2628,9 |
| 20                 | 1,528; 1528,2                                      | 1,562; 1874,0 | 1,595; 2233,2 | 1,629; 2605,9 |
| 40                 | 1,507; 1507,3                                      | 1,537; 1843,9 | 1,570; 2198,1 | 1,599; 2558,9 |
| 100                | 1,482; 1482,1                                      | 1,516; 1818,8 | 1,545; 2162,9 | 1,574; 2518,8 |

Продолжение табл. VII-4

| Избыток воздуха, % | Значения $c_{\text{ср}}$ и $i$ при температуре, °С |               |               |               |
|--------------------|----------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
|                    | 1800                                               | 2000          | 2200          | 2500          |
| 0                  | 1,675; 3014,5                                      | 1,712; 3424,8 | 1,746; 3840,9 | 1,800; 4500,8 |
| 20                 | 1,662; 2991,8                                      | 1,696; 3391,3 | 1,729; 3804,1 | 1,779; 4448,5 |
| 40                 | 1,629; 2931,6                                      | 1,662; 3324,3 | 1,691; 3721,2 | 1,742; 4354,3 |
| 100                | 1,604; 2886,4                                      | 1,634; 3265,7 | 1,662; 3656,8 | — ; 4270,5    |

Таблица VII-5

Средние теплоемкости  $c_{\text{ср}}$ , кДж/(м<sup>3</sup>·°С), и удельные энтальпии  $i$ , кДж/м<sup>3</sup>, продуктов сгорания смеси  $Q = 10450$  кДж/м<sup>3</sup> коксового и доменного газов с теплотой сгорания коксового газа (45,5%)  $Q = 18000$  кДж/м<sup>3</sup> и доменного газа (54,5%)  $Q_{\text{H}}^{\text{P}} = 4200$  кДж/м<sup>3</sup>

| Избыток воздуха, % | Значения $c_{\text{ср}}$ и $i$ при температуре, °С |              |              |              |               |
|--------------------|----------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
|                    | 0                                                  | 200          | 400          | 600          | 800           |
| 0                  | 1,365; 0                                           | 1,398; 279,7 | 1,432; 572,8 | 1,466; 879,2 | 1,499; 1199,1 |
| 20                 | 1,357; 0                                           | 1,390; 278,0 | 1,424; 569,4 | 1,457; 874,2 | 1,491; 1192,4 |
| 40                 | 1,348; 0                                           | 1,377; 275,5 | 1,407; 562,7 | 1,436; 861,6 | 1,491; 1172,3 |
| 100                | 1,336; 0                                           | 1,365; 272,9 | 1,394; 557,7 | 1,424; 854,1 | 1,453; 1162,3 |

| Избыток<br>воздуха,<br>% | Значения $c_{ср}$ и $t$ при температуре, °C |               |               |               |
|--------------------------|---------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
|                          | 1000                                        | 1200          | 1400          | 1600          |
| 0                        | 1,532; 1532,4                               | 1,570; 1884,1 | 1,603; 2244,9 | 1,637; 2619,3 |
| 20                       | 1,519; 1519,8                               | 1,553; 1863,9 | 1,587; 2221,5 | 1,620; 2592,5 |
| 40                       | 1,495; 1494,7                               | 1,524; 1828,8 | 1,553; 2174,6 | 1,583; 2532,2 |
| 100                      | 1,482; 1482,1                               | 1,511; 1813,7 | 1,541; 2157,0 | 1,570; 2512,1 |

| Избыток<br>воздуха,<br>% | Значения $c_{ср}$ и $t$ при температуре, °C |               |               |               |
|--------------------------|---------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
|                          | 1800                                        | 2000          | 2200          | 2500          |
| 0                        | 1,671; 3006,9                               | 1,704; 3408,1 | 1,742; 3831,8 | 1,792; 4479,9 |
| 20                       | 1,654; 2976,8                               | 1,683; 3366,2 | 1,717; 3776,5 | 1,767; 4417,1 |
| 40                       | 1,612; 2901,4                               | 1,641; 3282,5 | 1,671; 3675,2 | 1,717; 4291,5 |
| 100                      | 1,599; 2878,8                               | 1,629; 3257,3 | 1,658; 3647,5 | 1,699; 4249,6 |

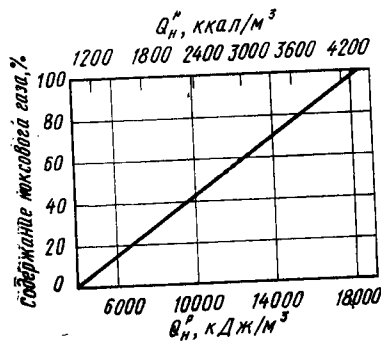


Рис. 52. Зависимость содержания коксового газа в смеси коксового и доменного газов от теплоты сгорания смеси  $Q_n^p$ . Для коксового газа  $Q_n = 18210$  кДж/м³; для доменного газа  $Q_n = 3894$  кДж/м³

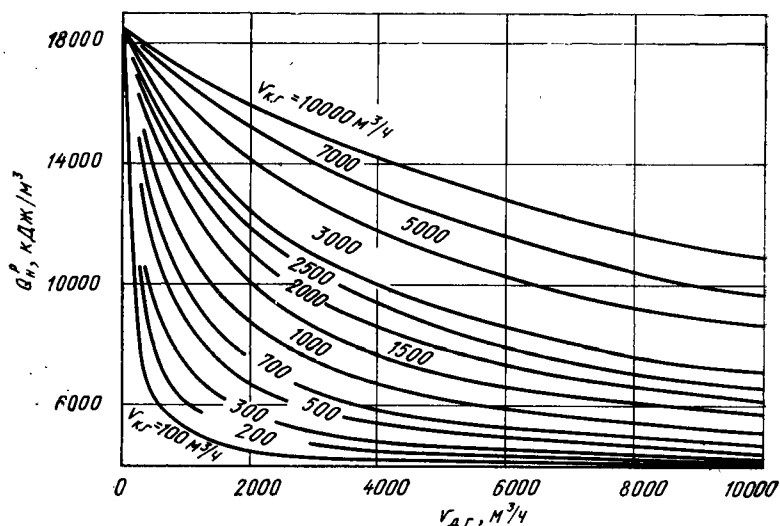


Рис. 53. Зависимость теплоты сгорания  $Q_R^P$  (газовой смеси от соотношения расходов коксового  $v_{к.г}$  ( $Q_H = 18210$  кДж/м³) и доменного  $v_{д.г}$  ( $Q_H = 3894$  кДж/м³) газов

Таблица VII-6

Средние теплоемкости  $c_{ср}$ , кДж/(м³·°C), и удельные энтальпии  $i$ , кДж/м³, продуктов сгорания коксового газа  $Q_H^P = 18000$  кДж/м³ при различных температурах

| Избыток воздуха, % | Значения $c_{ср}$ и $i$ при температуре, °C |              |              |              |               |
|--------------------|---------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
|                    | 0                                           | 200          | 400          | 600          | 800           |
| 0                  | 1,432; 0                                    | 1,474; 294,8 | 1,516; 606,3 | 1,562; 937,0 | 1,604; 1282,8 |
| 20                 | 1,398; 0                                    | 1,436; 287,2 | 1,474; 589,5 | 1,571; 906,9 | 1,549; 1239,3 |
| 40                 | 1,377; 0                                    | 1,411; 282,2 | 1,444; 577,8 | 1,482; 889,3 | 1,516; 1212,5 |
| 100                | 1,348; 0                                    | 1,377; 275,5 | 1,407; 562,7 | 1,436; 861,6 | 1,469; 1175,7 |

Продолжение табл. VII-6

| Избыток воздуха, % | Значения $c_{ср}$ и $i$ при температуре, °C |               |               |               |
|--------------------|---------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
|                    | 1000                                        | 1200          | 1400          | 1600          |
| 0                  | 1,649; 1649,6                               | 1,692; 2029,8 | 1,733; 2426,7 | 1,779; 2847,0 |
| 20                 | 1,587; 1586,8                               | 1,629; 1954,4 | 1,666; 1076,8 | 1,704; 2726,4 |
| 40                 | 1,549; 1549,1                               | 1,587; 1904,2 | 1,620; 2268,4 | 1,654; 2646,1 |
| 100                | 1,499; 1498,8                               | 1,528; 1833,8 | 1,562; 2186   | 1,591; 2545,6 |

Продолжение табл. VII-6

| Избыток воздуха, % | Значения $c_{ср}$ и $i$ при температуре, °C |               |               |               |
|--------------------|---------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
|                    | 1800                                        | 2000          | 2200          | 2500          |
| 0                  | 1,821; 3278,3                               | 1,863; 3726,3 | 1,909; 4200,2 | 1,976; 4940,4 |
| 20                 | 1,742; 3135,1                               | 1,779; 3558,8 | 1,817; 3997,6 | 1,876; 4689,2 |
| 40                 | 1,691; 3086,5                               | 1,725; 3449,9 | 1,758; 3868,6 | 1,813; 4536,4 |
| 100                | 1,620; 2916,5                               | 1,649; 3299,2 | 1,683; 3702,8 | 1,729; 4322,9 |

Характеристика генераторных газов

| Исходное топливо       | Состав генераторного газа, % (объемн.) |      |                |                 |                               |                             |                  | Плотность при нор-<br>мальных условиях<br>$\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | Теплота сгорания<br>сухого топлива<br>$Q_H$ , кДж/м <sup>3</sup> |
|------------------------|----------------------------------------|------|----------------|-----------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
|                        | CO <sub>2</sub>                        | CO   | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>m</sub> H <sub>n</sub> | N <sub>2</sub> <sup>*</sup> | H <sub>2</sub> S |                                                                      |                                                                  |
|                        |                                        |      |                |                 |                               |                             |                  |                                                                      |                                                                  |
| Антрацит донецкий      | 5,5                                    | 27,5 | 13,5           | 0,5             | —                             | 52,6                        | 0,2              | 1,135                                                                | 5150                                                             |
| Богословский уголь     | 8,0                                    | 24,0 | 13,6           | 2,2             | 0,3                           | 51,7                        | —                | 1,142                                                                | 5455                                                             |
| Газовый донецкий уголь | 5,0                                    | 26,5 | 13,5           | 2,3             | 0,3                           | 51,9                        | 0,3              | 1,122                                                                | 5870                                                             |
| Северодонецкий уголь   | 7,0                                    | 25,0 | 15,0           | 2,5             | 0,3                           | 49,0                        | 1,0              | 1,119                                                                | 6075                                                             |
| Черемховский уголь     | 7,0                                    | 25,5 | 15,5           | 2,6             | 0,4                           | 48,7                        | 0,1              | 1,110                                                                | 6079                                                             |
| Челябинский уголь      | 5,0                                    | 30,0 | 13,0           | 2,0             | 0,2                           | 49,4                        | 0,2              | 1,128                                                                | 6067                                                             |
| Подмосковный уголь     | 6,5                                    | 25,0 | 14,0           | 2,2             | 0,3                           | 50,6                        | 1,2              | 1,130                                                                | 5908                                                             |
| Коксовая мелочь        | 5,0                                    | 28,5 | 13,0           | 0,7             | —                             | 52,4                        | 0,2              | 1,136                                                                | 5296                                                             |
| Торф машинформовочный  | 8,0                                    | 28,0 | 15,0           | 3,0             | 0,4                           | 45,3                        | 0,1              | 1,126                                                                | 6281                                                             |
| Гидроторф              | 8,5                                    | 27,5 | 15,0           | 2,5             | 0,4                           | 45,8                        | 0,1              | 1,127                                                                | 6243                                                             |
| Древесина (шепа)       | 6,5                                    | 29,0 | 14,0           | 3,0             | 0,4                           | 46,9                        | —                | 1,122                                                                | 6477                                                             |

\* Содержание кислорода во всех газах 0,2%.

Таблица VII-8

Средний состав некоторых нефтепромысловых (попутных) газов

| Месторождение | Состав газа, % (объемн.)                       |                                              |                                              |                                        |                               |                                        |                                    |                                |                                        |                                            | Низшая тепло-<br>та сгорания<br>$Q_H^P$ , кДж/м <sup>3</sup> | Плотность $\rho$ ,<br>кг/м <sup>3</sup>            |           |
|---------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------|
|               | CH <sub>4</sub>                                | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>                | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>                | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>         | C <sub>m</sub> H <sub>n</sub> | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>         | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>     | H <sub>2</sub> S               | CO <sub>2</sub>                        | N <sub>2</sub>                             |                                                              |                                                    |           |
|               |                                                |                                              |                                              |                                        |                               |                                        |                                    |                                |                                        |                                            |                                                              |                                                    |           |
| Туймазинское  | { 30,0<br>39,5<br>57,5<br>42,7<br>40,0<br>23,7 | 13,0<br>20,0<br>15,0<br>20,0<br>19,5<br>12,0 | 14,3<br>18,5<br>11,0<br>19,5<br>18,0<br>10,0 | 6,3<br>7,7<br>8,0<br>9,5<br>7,5<br>2,8 | —<br>—<br>—<br>—<br>—<br>—    | 3,3<br>2,8<br>4,0<br>2,9<br>3,8<br>1,5 | 1,4<br>1,4<br>—<br>—<br>1,1<br>1,0 | 0,7<br>—<br>—<br>—<br>—<br>2,0 | 1,0<br>0,1<br>1,5<br>0,2<br>0,1<br>1,0 | 30,0<br>10,0<br>3,0<br>5,2<br>10,0<br>46,0 | 46892<br>59453<br>55433<br>61337<br>59536<br>32783           | 1,293<br>1,293<br>1,165<br>1,293<br>1,423<br>1,293 |           |
| Ромашкинское  | 67-99                                          | 0-10                                         | 10,1-3,2                                     | 0,1-3,2                                | 0,2-1,7                       | —                                      | —                                  | —                              | 0-25,0                                 | 3,0                                        | —                                                            | —                                                  | 0,71-1,1  |
| Шугуровское   | Бакнское                                       | 2,5-8,1                                      | 2,8-12,9                                     | 6-17,0                                 | 5,6-8,1                       | —                                      | —                                  | —                              | 0,7                                    | —                                          | —                                                            | —                                                  | 0,71-1,1  |
| Грозненское   | 53-81                                          | 0,7-10,9                                     | 3-3,0                                        | 0,5-6,7                                | 2,3-6,3                       | —                                      | —                                  | —                              | 0-6,4                                  | —                                          | —                                                            | —                                                  | 1,07-1,45 |
| Майкопское    | 67-96                                          | 1-16                                         | 0,2-12,7                                     | 0,1-7,5                                | 0,1-3,8                       | —                                      | —                                  | —                              | 0-3,8                                  | —                                          | —                                                            | —                                                  | 0,84-1,2  |
| Казакское     | 60-95                                          | 15,8                                         | 15,8                                         | 15,8                                   | —                             | —                                      | —                                  | —                              | 3,5                                    | 20,1                                       | 1,6                                                          | 35169-54010                                        | 0,85-1,1  |
| Сызранское    | 29                                             | 9,2                                          | 7,0                                          | 5,3                                    | 3,3                           | —                                      | —                                  | —                              | —                                      | 8,4                                        | 48148                                                        | —                                                  | 1,42      |
| Кинельское    | 64                                             | 12,0                                         | 20,5                                         | 7,2                                    | 3,1                           | —                                      | —                                  | —                              | 2,5                                    | 11,0                                       | 47102                                                        | —                                                  | 1,2       |
| Ишимбаевское  | 42,4                                           | 7,2                                          | 1,7                                          | 2,1                                    | 1,4                           | —                                      | —                                  | —                              | 2,8                                    | 1,8                                        | 51916                                                        | —                                                  | 1,38      |
| Грузинское    | 85,4                                           | —                                            | —                                            | —                                      | —                             | —                                      | —                                  | —                              | 0,4                                    | —                                          | 40193                                                        | —                                                  | 0,87      |

Примерный состав сухих природных газов различных месторождений СССР

| Месторождение                    | Состав, % (объемн.) |                               |                               |                                |                               |                 |                  | Относительная масса (по отношению к воздуху) | Нижняя теплота сгорания $Q_{н.}^p$ кДж/м <sup>3</sup> |
|----------------------------------|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------|------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
|                                  | CH <sub>4</sub>     | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | C <sub>m</sub> H <sub>n</sub> | CO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> S | N <sub>2</sub>                               |                                                       |
| Еланское (Саратовская обл.)      | 93,2                | 0,7                           | 0,6                           | 0,6                            | 0,5                           | —               | Следы            | 4,4                                          | 35169                                                 |
| Курдюмовское (Саратовская обл.)  | 92,2                | 0,8                           | —                             | 1,0                            | —                             | —               | —                | 6,0                                          | 34332                                                 |
| Бугурусланское                   | 77,8                | 4,4                           | 1,7                           | 0,8                            | 0,6                           | 0,2             | 1,0              | 13,5                                         | 34122                                                 |
| Газлинское (Бухара — Урал)       | 94,16               | 2,49                          | 0,38                          | 0,24                           | —                             | 0,13            | —                | 2,6                                          | —                                                     |
| Краснодарское                    | 90,8                | 5,4                           | 1,2                           | 0,3                            | 0,7                           | 0,6             | —                | 1,0                                          | —                                                     |
| Иранское                         | 83,41               | 12,16                         | 3,45                          | 0,97                           | 0,01                          | —               | —                | —                                            | —                                                     |
| Мирнинское (Ставропольский край) | 83,05               | 9,13                          | 1,42                          | 0,54                           | 0,46                          | 4,09            | —                | 1,31                                         | —                                                     |
| Средняя Азия — Центр             | 93,5                | 3,3                           | 0,5                           | 0,3                            | 0,2                           | 0,5             | —                | 1,7                                          | —                                                     |
| Игиримско-Березовское            | 94,66               | 1,81                          | 0,41                          | 0,17                           | 0,1                           | 0,57            | —*               | 2,26                                         | —                                                     |
| Карагазский газ (после ГБЗ)      | 96,6                | 2,9                           | 0,5                           | —                              | —                             | —               | —                | —                                            | —                                                     |
| Усть-Видлюйское                  | 94,8                | 2,3                           | 0,9                           | 0,5                            | 0,3                           | —               | —                | —                                            | —                                                     |
| Медвежье                         | 98,5                | 0,08                          | 0,003                         | 0,001                          | —                             | 0,2             | —*               | 1,0                                          | —                                                     |
| Северо-Сахалинские месторождения | 90,4                | 1,9                           | 1,1                           | 0,6                            | 0,2                           | 0,1             | —                | 1,3                                          | —                                                     |
| Оренбургское                     | 85,78               | 4,84                          | 1,1                           | 0,6                            | 0,2                           | 4,7             | —                | 1,1                                          | —                                                     |
| Оренбургское (после ГПЗ)         | 88,03               | 4,79                          | 1,46                          | 0,586                          | 0,452                         | 0,581           | 1,267            | 4,95**                                       | —                                                     |
| Южно-Дагестанское                | 86,5                | 3,0                           | 0,9                           | 0,1                            | 0,285                         | —               | —                | 4,96                                         | —                                                     |
| Мелитопольское                   | 98,0                | —                             | —                             | —                              | —                             | 7,3             | —                | 2,2                                          | 33913                                                 |
| Ухтинское                        | 88,0                | 1,9                           | —                             | —                              | —                             | 0,2             | —                | 1,8                                          | 35378                                                 |
| Тульское, Красnodарского края    | 97,8                | 0,4                           | 0,2                           | 0,3                            | —                             | 0,3             | —                | 9,3                                          | 31610                                                 |
| Мельниково, Саратовской обл.     | —                   | —                             | —                             | 0,3                            | —                             | 0,2             | Следы            | 1,3                                          | 35588                                                 |
| западное поле                    | 55,0                | —                             | —                             | —                              | —                             | 0,2             | »                | 44,8                                         | 19887                                                 |
| восточное поле                   | 88,0                | 0,2                           | —                             | —                              | —                             | 0,1             | »                | 11,7                                         | 31401                                                 |
| Ставрополь Кавказский:           | —                   | —                             | —                             | —                              | —                             | —               | —                | —                                            | —                                                     |
| северное поле                    | 97,7                | —                             | —                             | —                              | —                             | 0,7             | —                | 1,6                                          | 35169                                                 |
| южное поле                       | 60,0                | —                             | —                             | —                              | —                             | —               | —                | 40,0                                         | 21771                                                 |
| Меловые горы (Новоросси́йск)     | 94,4                | —                             | —                             | —                              | —                             | 0,6             | —                | 5,0                                          | 34960                                                 |
| Западная Украина:                | —                   | —                             | —                             | —                              | —                             | —               | —                | —                                            | —                                                     |
| Калуш                            | 95,7                | —                             | —                             | —                              | —                             | 0,1             | —                | 4,2                                          | 34332                                                 |
| Дашава                           | 97,8                | 0,5                           | 0,2                           | 0,1                            | 0,05                          | —               | —                | 1,3                                          | 36006                                                 |
| Косов                            | 75,7                | 21,3                          | 1,4                           | 1,6                            | —                             | —               | —                | —                                            | 42705                                                 |
| Опары                            | 89,0                | 9,1                           | —                             | 1,9                            | —                             | —               | —                | —                                            | 39565                                                 |

| Месторождение         | Состав, % (объемн.) |                               |                               |                                |                               |                 | Относительная масса (по отношению к воздуху) | Низшая теплота сгорания $Q_n^P$ , кДж/м <sup>3</sup> |
|-----------------------|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------|
|                       | CH <sub>4</sub>     | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> | CO <sub>2</sub> |                                              |                                                      |
| Арчидинское . . . . . | 99,4                | 0,6                           | —                             | —                              | —                             | —               | —                                            | 35923                                                |
| Шелебинское:          |                     |                               |                               |                                |                               |                 |                                              |                                                      |
| I . . . . .           | 93,5                | 4,0                           | 1,0                           | 0,5                            | 0,5                           | 0,1             | 0,4                                          | 38225                                                |
| II* . . . . .         | 89,9                | 3,1                           | 0,9                           | 0,4                            | —                             | —               | 5,2                                          | 35462                                                |
| III* . . . . .        | 92,6                | 4,21                          | 0,9                           | 0,79                           | —                             | 0,15            | 1,4                                          | 37639                                                |

\*<sup>#1</sup> По данным отдельных анализов. \*<sup>#2</sup> 0,02 Н<sub>2</sub>. \*<sup>#3</sup> 0,02 Н<sub>2</sub>. \*<sup>#4</sup> 0,06 Н<sub>2</sub>.

Таблица VII-10

### Средний состав и теплотехнические характеристики природных газов

| Месторождение,<br>горизонт  | Состав газа, % (объемн.) |                               |                               |                                |                                |                 |                | Низшая теплота сгорания<br>$Q_H$ , кДж/м <sup>3</sup> | Объемная масса по воз-<br>духу | Теоретический объем<br>воздуха $L$ теор., м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> | Теоретический объем<br>сухих продуктов сгора-<br>ния $V_{\text{сух}}$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> | Отношение объемов сухих<br>и влажных продуктов<br>сгорания, $b$ | Теплота сгорания, отне-<br>сенная к 1 м <sup>3</sup> сухих про-<br>дуктов сгорания $Q_{\text{сух}}$ ,<br>кДж/м <sup>3</sup> | Теплота сгорания, отне-<br>сенная к 1 м <sup>3</sup> влажных<br>продуктов сгорания<br>$Q_{\text{в}}$ , кДж/м <sup>3</sup> | Жаропроизводительность<br>(при сжигании в возду-<br>шно-сухом воздухе)<br>$t_{\text{ж}}$ , °C | Жаропроизводительность<br>(при сжигании в возду-<br>хе, содержащем 1% вла-<br>ги по весу) $t_{\text{ж}}$ , °C | R <sub>02</sub> сухих продуктов<br>сгорания, % |                  |      |
|-----------------------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|----------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------|------|
|                             | CH <sub>4</sub>          | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | C <sub>4</sub> H <sub>12</sub> | CO <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |                                                       |                                |                                                                          |                                                                                                        |                                                                 |                                                                                                                             |                                                                                                                           |                                                                                               |                                                                                                               |                                                | H <sub>2</sub> S |      |
| Ставропольское:             |                          |                               |                               |                                |                                |                 |                |                                                       |                                |                                                                          |                                                                                                        |                                                                 |                                                                                                                             |                                                                                                                           |                                                                                               |                                                                                                               |                                                |                  |      |
| Хадумский                   | 98,7                     | 0,35                          | 0,12                          | 0,06                           | —                              | 0,1             | 0,67           | —                                                     | 35713                          | 0,56                                                                     | 9,5                                                                                                    | 8,5                                                             | 10,5                                                                                                                        | 0,81                                                                                                                      | 4187                                                                                          | 3412                                                                                                          | 2040                                           | 2010             | 11,8 |
| Зеленая свита               | 85,0                     | 4,4                           | 2,4                           | 1,8                            | —                              | 0,1             | 5,0            | —                                                     | 38365                          | 0,67                                                                     | 10,4                                                                                                   | 9,4                                                             | 11,5                                                                                                                        | 0,82                                                                                                                      | 4187                                                                                          | 3412                                                                                                          | 2040                                           | 2010             | 12,2 |
| Верейский                   | 98,5                     | 0,5                           | 0,1                           | —                              | —                              | —               | 0,9            | —                                                     | 35713                          | 0,56                                                                     | 9,5                                                                                                    | 8,5                                                             | 10,5                                                                                                                        | 0,81                                                                                                                      | 4187                                                                                          | 3412                                                                                                          | 2040                                           | 2010             | 11,8 |
| Еланское место-<br>рождение |                          |                               |                               |                                |                                |                 |                |                                                       |                                |                                                                          |                                                                                                        |                                                                 |                                                                                                                             |                                                                                                                           |                                                                                               |                                                                                                               |                                                |                  |      |
| Саратов-<br>ской обл.:      |                          |                               |                               |                                |                                |                 |                |                                                       |                                |                                                                          |                                                                                                        |                                                                 |                                                                                                                             |                                                                                                                           |                                                                                               |                                                                                                               |                                                |                  |      |
| Верейский горизонт          | 94,0                     | 1,8                           | 0,4                           | 0,1                            | 0,1                            | 0,1             | 3,5            | —                                                     | 35337                          | 0,59                                                                     | 9,4                                                                                                    | 8,4                                                             | 10,4                                                                                                                        | 0,81                                                                                                                      | 4187                                                                                          | 3391                                                                                                          | 2030                                           | 2000             | 11,8 |
| Девонский горизонт          | 95,1                     | 2,3                           | 0,7                           | 0,4                            | 0,8                            | 0,2             | 0,5            | —                                                     | 37807                          | 0,60                                                                     | 10,0                                                                                                   | 9,0                                                             | 11,1                                                                                                                        | 0,81                                                                                                                      | 4187                                                                                          | 3412                                                                                                          | 2030                                           | 2010             | 12,0 |
| Бугурусланское              | 81,7                     | 5,0                           | 2,0                           | 1,2                            | 0,6                            | 0,4             | 8,5            | 0,6                                                   | 36718                          | 0,66                                                                     | 9,7                                                                                                    | 8,8                                                             | 10,8                                                                                                                        | 0,81                                                                                                                      | 4145                                                                                          | 3391                                                                                                          | 2030                                           | 2000             | 12,0 |
| Дашаевское (УССР)           | 98,3                     | 0,3                           | 0,12                          | 0,15                           | —                              | 0,1             | 1,03           | —                                                     | 35672                          | 0,56                                                                     | 9,5                                                                                                    | 8,5                                                             | 10,5                                                                                                                        | 0,81                                                                                                                      | 4187                                                                                          | 3412                                                                                                          | 2040                                           | 2010             | 11,8 |
| Лебединское (УССР)          | 93,5                     | 1,0                           | 1,0                           | 0,5                            | 0,5                            | 0,1             | 0,4            | —                                                     | 38225                          | 0,64                                                                     | 10,4                                                                                                   | 9,1                                                             | 11,2                                                                                                                        | 0,81                                                                                                                      | 4187                                                                                          | 3412                                                                                                          | 2040                                           | 2010             | 12,0 |

Таблица VII-11

Константы равновесия реакций диссоциации и конверсии метана

| Температура, °K | $\text{CH}_4 \rightleftharpoons \text{C} + 2\text{H}_2$ | $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO} + 3\text{H}_2$ | $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$ | $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO} + 2\text{H}_2$ |
|-----------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 298             | $1,263 \cdot 10^{-9}$                                   | $1,203 \cdot 10^{-17}$                                                        | $1,249 \cdot 10^{-24}$                                                           | $1,158 \cdot 10^{-30}$                                                  |
| 400             | $3,179 \cdot 10^{-6}$                                   | $2,333 \cdot 10^{-16}$                                                        | $3,610 \cdot 10^{-13}$                                                           | $1,507 \cdot 10^{-19}$                                                  |
| 500             | $3,737 \cdot 10^{-4}$                                   | $8,284 \cdot 10^{-11}$                                                        | $1,137 \cdot 10^{-8}$                                                            | $6,037 \cdot 10^{-13}$                                                  |
| 600             | $9,991 \cdot 10^{-3}$                                   | $4,808 \cdot 10^{-7}$                                                         | $1,359 \cdot 10^{-5}$                                                            | $1,701 \cdot 10^{-8}$                                                   |
| 700             | 0,112                                                   | $2,557 \cdot 10^{-4}$                                                         | $2,407 \cdot 10^{-3}$                                                            | $2,717 \cdot 10^{-5}$                                                   |
| 800             | 0,713                                                   | $2,983 \cdot 10^{-2}$                                                         | 0,126                                                                            | $7,071 \cdot 10^{-3}$                                                   |
| 900             | 3,096                                                   | 1,247                                                                         | 2,864                                                                            | 0,543                                                                   |
| 1000            | 10,200                                                  | 25,20                                                                         | 36,070                                                                           | 17,60                                                                   |
| 1100            | 27,400                                                  | $2,998 \cdot 10^3$                                                            | $2,941 \cdot 10^3$                                                               | $3,036 \cdot 10^3$                                                      |
| 1200            | 62,760                                                  | $2,360 \cdot 10^3$                                                            | $1,717 \cdot 10^3$                                                               | $3,245 \cdot 10^3$                                                      |
| 1300            | $1,271 \cdot 10^3$                                      | $1,360 \cdot 10^4$                                                            | $7,695 \cdot 10^3$                                                               | $2,404 \cdot 10^4$                                                      |
| 1400            | $2,331 \cdot 10^3$                                      | $6,098 \cdot 10^4$                                                            | $2,800 \cdot 10^4$                                                               | $1,328 \cdot 10^5$                                                      |
| 1500            | $3,954 \cdot 10^3$                                      | $2,241 \cdot 10^5$                                                            | $8,622 \cdot 10^4$                                                               | $5,824 \cdot 10^5$                                                      |
| 1600            | $6,282 \cdot 10^3$                                      | $6,987 \cdot 10^5$                                                            | —                                                                                | $2,109 \cdot 10^6$                                                      |
| 1700            | $9,452 \cdot 10^3$                                      | $1,903 \cdot 10^6$                                                            | —                                                                                | $6,537 \cdot 10^6$                                                      |
| 1800            | $1,362 \cdot 10^4$                                      | $4,639 \cdot 10^6$                                                            | $1,209 \cdot 10^5$                                                               | $1,778 \cdot 10^7$                                                      |
| 1900            | $1,887 \cdot 10^4$                                      | $1,028 \cdot 10^7$                                                            | $2,432 \cdot 10^5$                                                               | $3,344 \cdot 10^7$                                                      |
| 2000            | $2,530 \cdot 10^4$                                      | $2,100 \cdot 10^7$                                                            | $4,565 \cdot 10^5$                                                               | $9,659 \cdot 10^7$                                                      |
| 2100            | $3,296 \cdot 10^4$                                      | $3,986 \cdot 10^7$                                                            | $8,027 \cdot 10^5$                                                               | $1,980 \cdot 10^8$                                                      |
| 2200            | $4,189 \cdot 10^4$                                      | $7,133 \cdot 10^7$                                                            | $1,345 \cdot 10^6$                                                               | $1,782 \cdot 10^8$                                                      |
| 2300            | $5,221 \cdot 10^4$                                      | $1,213 \cdot 10^8$                                                            | $2,157 \cdot 10^6$                                                               | $6,820 \cdot 10^8$                                                      |
| 2400            | $6,538 \cdot 10^4$                                      | $2,016 \cdot 10^8$                                                            | $3,400 \cdot 10^6$                                                               | $1,169 \cdot 10^9$                                                      |
| 2500            | $7,689 \cdot 10^4$                                      | $3,073 \cdot 10^8$                                                            | $4,941 \cdot 10^6$                                                               | $1,911 \cdot 10^9$                                                      |

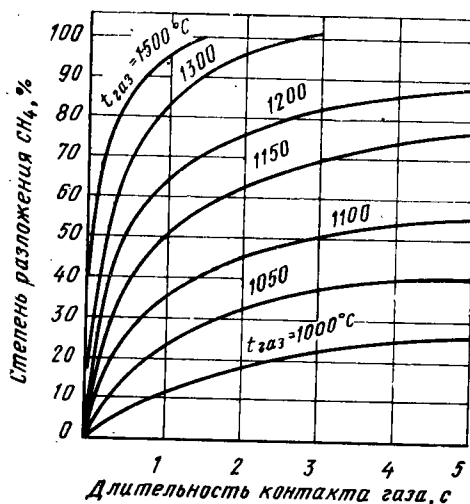
Рис. 54. Зависимость степени разложения метана от температуры и длительности  $t_{\text{к}}$  контактирования с поверхностью нагрева

Таблица VII-12

Состав газовой смеси, образующейся по реакции  $\text{CH}_4 \rightleftharpoons \text{C} + 2\text{H}_2$ , % (объемн.)

| Температура, °C | $\text{CH}_4$ | $\text{H}_2$ |
|-----------------|---------------|--------------|
| 300             | 96,90         | 3,10         |
| 400             | 86,16         | 13,84        |
| 475             | 69,86         | 30,14        |
| 500             | 62,53         | 37,47        |
| 506             | 60,71         | 39,29        |
| 536             | 51,16         | 48,84        |
| 550             | 46,69         | 53,31        |
| 567             | 41,26         | 58,74        |
| 600             | 31,68         | 68,32        |
| 700             | 11,07         | 88,93        |
| 800             | 4,41          | 95,59        |
| 1000            | 0,50          | 99,50        |
| 1100            | 0,20          | 99,80        |

Таблица VII-13

Состав равновесной смеси  
при реакции  $\text{CO}_2 + \text{C} \rightleftharpoons 2\text{CO}$   
(по Будауру), % (объемн.)

| Темпера-<br>тура, °C | При установившемся равновесии в опыте |                 |
|----------------------|---------------------------------------|-----------------|
|                      | CO                                    | CO <sub>2</sub> |
| 445                  | 0,6                                   | 99,4            |
| 550                  | 10,7                                  | 89,3            |
| 650                  | 39,8                                  | 60,2            |
| 800                  | 93,0                                  | 7,00            |
| 925                  | 96,0                                  | 4,0             |

Таблица VII-14

Равновесный состав  
воздушного газа,  
% (объемн.)

| Темпера-<br>тура, °C | CO <sub>2</sub> | CO   | N <sub>2</sub> | $\frac{\text{CO}}{\text{CO}_2 + \text{CO}} \cdot 100$ |
|----------------------|-----------------|------|----------------|-------------------------------------------------------|
| 650                  | 10,8            | 16,9 | 72,3           | 61,0                                                  |
| 800                  | 1,6             | 31,9 | 66,5           | 95,2                                                  |
| 900                  | 0,4             | 34,1 | 65,5           | 98,8                                                  |
| 1000                 | 0,2             | 34,4 | 65,4           | 99,8                                                  |

Таблица VII-15

Уравнение констант равновесия реакций

| Реакция                                                                                                          | Константы равновесия K                                              | Уравнения констант равновесия                                                                                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{C} + \text{O}_2$<br>$\text{C} + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{CO}_2$ | $\frac{1}{K}$<br>$\frac{(\text{CO}_2)}{(\text{O}_2)}$               | $\lg K = \frac{-20582,8}{T} - 0,302 \lg T +$<br>$+ 1,43 \cdot 10^{-4} T - 2,4 \cdot 10^{-8} T^2 + 0,622$     |
| $2\text{C} + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO}$                                                           | $\frac{(\text{CO})^2}{(\text{O}_2)}$                                | $\lg K = \frac{-11635,1}{T} + 2,1656 \lg T -$<br>$- 9,4 \cdot 10^{-4} T + 8,76 \cdot 10^{-7} T^2 + 3,394$    |
| $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO}_2$                                                        | $\frac{(\text{CO}_2)^2}{(\text{O}_2)(\text{CO})^2}$                 | $\lg K = \frac{-29530,5}{T} - 2,769 \lg T +$<br>$+ 0,001225 T - 1,356 \cdot 10^{-7} T^2 - 2,15$              |
| $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}$                                                | $\frac{(\text{H}_2\text{O})^2}{(\text{H}_2)^2 (\text{O}_2)}$        | $\lg K = \frac{-25116,1}{T} - 0,9466 \lg T -$<br>$- 7,216 \cdot 10^{-4} T + 1,618 \cdot 10^{-7} T^2 - 1,714$ |
| $\text{CO}_2 + \text{C} \rightleftharpoons 2\text{CO}$                                                           | $\frac{(\text{CO})^2}{(\text{CO}_2)}$                               | $\lg K = \frac{-8947,7}{T} + 2,4675 \lg T -$<br>$- 0,0010824 T + 1,16 \cdot 10^{-7} T^2 + 2,772$             |
| $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO} + \text{H}_2$                                        | $\frac{(\text{CO})(\text{H}_2)}{(\text{H}_2\text{O})}$              | $\lg K = \frac{-6740,5}{T} + 1,5561 \lg T -$<br>$- 1,092 \cdot 10^{-4} T - 3,71 \cdot 10^{-7} T^2 + 2,554$   |
| $\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + 2\text{H}_2$                                    | $\frac{(\text{CO}_2)(\text{H}_2)^2}{(\text{H}_2\text{O})^2}$        | $\lg K = \frac{-4533,3}{T} + 0,6446 \lg T +$<br>$+ 3,646 \cdot 10^{-4} T - 1,858 \cdot 10^{-7} T^2 + 2,336$  |
| $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$                                     | $\frac{(\text{CO}_2)(\text{H}_2)}{(\text{CO})(\text{H}_2\text{O})}$ | $\lg K = \frac{-2207,2}{T} + 0,9115 \lg T -$<br>$- 0,09738 T + 1,487 \cdot 10^{-7} T^2 + 0,098$              |
| $\text{C} + 2\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_4$                                                          | $\frac{(\text{CH}_4)}{(\text{H}_2)^2}$                              | $\lg K = \frac{-3348}{T} - 5,957 \lg T +$<br>$+ 0,00186 T + 1,095 \cdot 10^{-7} T^2 + 11,79$                 |

**Логарифмы констант равновесия реакций при различной температуре, К**

| Реакция                               | 500    | 1000   | 1500   | 2000   | Реакция                                    | 500    | 1000   | 1500   | 2000   |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| $C + O_2 \rightleftharpoons CO_2$     | 41,040 | 20,418 | 13,545 | 10,106 | $C + H_2O \rightleftharpoons CO + H_2$     | -6,790 | 0,335  | 2,755  | 3,954  |
| $2C + O_2 \rightleftharpoons 2CO$     | 32,063 | 20,673 | 16,815 | 14,830 | $C + 2H_2O \rightleftharpoons CO_2 + 2H_2$ | -4,603 | 0,415  | 2,240  | 3,183  |
| $2CO + O_2 \rightleftharpoons 2CO_2$  | 50,017 | 20,163 | 10,275 | 5,382  | $CO_2 + H_2 \rightleftharpoons CO + H_2O$  | -2,31  | 0,20   | 0,40   | 0,62   |
| $2H_2 + O_2 \rightleftharpoons 2H_2O$ | 46,643 | 20,003 | 11,305 | 6,932  | $C + 2H_2 \rightleftharpoons CH_4$         | 3,312  | -0,982 | -2,351 | -2,918 |
| $C + CO_2 \rightleftharpoons 2CO$     | -8,977 | 0,255  | 3,270  | 4,724  |                                            |        |        |        |        |

**Степень диссоциации водяного пара, %**

| $t, ^\circ\text{C}$ |      | Парциальное давление водяного пара, $\text{kH/M}^2$ |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------|------|-----------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                     |      | 2,94                                                | 3,93 | 4,90 | 5,88 | 6,86 | 7,85 | 8,83 | 9,81 | 11,77 | 13,73 | 15,69 | 17,65 | 19,61 | 24,52 | 29,42 | 34,32 | 39,23 | 44,13 | 49,03 | 53,94 | 58,85 | 78,75 | 88,26 | 98,07 |
| 1600                | 0,90 | 0,85                                                | 0,80 | 0,75 | 0,70 | 0,65 | 0,63 | 0,60 | 0,58 | 0,56  | 0,54  | 0,52  | 0,50  | 0,48  | 0,46  | 0,44  | 0,42  | 0,40  | 0,38  | 0,35  | 0,32  | 0,30  | 0,29  | 0,28  |       |
| 1700                | 1,60 | 1,45                                                | 1,35 | 1,27 | 1,20 | 1,16 | 1,15 | 1,08 | 1,02 | 0,95  | 0,90  | 0,85  | 0,80  | 0,76  | 0,73  | 0,70  | 0,67  | 0,64  | 0,62  | 0,60  | 0,57  | 0,54  | 0,52  | 0,50  |       |
| 1800                | 2,70 | 2,40                                                | 2,25 | 2,10 | 2,00 | 1,90 | 1,85 | 1,80 | 1,70 | 1,60  | 1,53  | 1,46  | 1,40  | 1,30  | 1,25  | 1,20  | 1,15  | 1,10  | 1,05  | 1,00  | 0,95  | 0,90  | 0,86  | 0,83  |       |
| 1900                | 4,45 | 4,05                                                | 3,80 | 3,60 | 3,40 | 3,25 | 3,10 | 3,00 | 2,85 | 2,70  | 2,60  | 2,50  | 2,40  | 2,20  | 2,10  | 2,00  | 1,90  | 1,80  | 1,70  | 1,63  | 1,56  | 1,50  | 1,45  | 1,40  |       |
| 2000                | 6,30 | 5,75                                                | 5,35 | 5,05 | 4,80 | 4,60 | 4,45 | 4,30 | 4,00 | 3,80  | 3,55  | 3,50  | 3,40  | 3,15  | 2,95  | 2,80  | 2,65  | 2,57  | 2,50  | 2,40  | 2,30  | 2,20  | 2,10  | 2,00  |       |
| 2100                | 9,35 | 8,55                                                | 7,95 | 7,50 | 7,10 | 6,80 | 6,55 | 6,35 | 6,00 | 5,70  | 5,45  | 5,25  | 5,10  | 4,80  | 4,55  | 4,30  | 4,10  | 3,90  | 3,70  | 3,55  | 3,40  | 3,25  | 3,10  | 3,00  |       |
| 2200                | 13,4 | 12,3                                                | 11,5 | 10,8 | 10,3 | 9,90 | 9,60 | 9,30 | 8,80 | 8,35  | 7,95  | 7,65  | 7,40  | 6,90  | 6,50  | 6,25  | 5,90  | 5,65  | 5,40  | 5,10  | 4,90  | 4,70  | 4,55  | 4,40  |       |
| 2300                | 17,5 | 16,0                                                | 15,4 | 15,0 | 14,3 | 13,7 | 13,3 | 12,9 | 12,2 | 11,6  | 11,1  | 10,7  | 10,4  | 9,6   | 9,1   | 8,7   | 8,4   | 8,0   | 7,7   | 7,3   | 6,9   | 6,7   | 6,4   | 6,2   |       |
| 2400                | 24,4 | 22,5                                                | 21,0 | 20,0 | 19,1 | 18,4 | 17,7 | 17,2 | 16,3 | 15,6  | 15,0  | 14,4  | 13,9  | 13,0  | 12,2  | 11,7  | 11,2  | 10,8  | 10,4  | 9,9   | 9,4   | 9,0   | 8,7   | 8,4   |       |
| 2500                | 30,9 | 28,5                                                | 26,8 | 25,6 | 24,5 | 23,5 | 22,7 | 22,1 | 20,9 | 20,0  | 19,3  | 18,6  | 18,0  | 16,8  | 15,9  | 15,2  | 14,6  | 14,1  | 13,7  | 12,9  | 12,3  | 11,7  | 11,3  | 11,0  |       |
| 2600                | 39,7 | 37,1                                                | 35,1 | 33,5 | 32,1 | 31,0 | 30,1 | 29,2 | 27,8 | 26,7  | 25,7  | 24,8  | 24,1  | 22,6  | 21,5  | 20,5  | 19,7  | 19,1  | 18,5  | 17,5  | 16,7  | 16,0  | 15,5  | 15,0  |       |
| 2700                | 47,3 | 44,7                                                | 42,6 | 40,7 | 39,2 | 37,9 | 36,9 | 35,9 | 34,2 | 33,0  | 31,8  | 30,8  | 29,9  | 28,2  | 26,8  | 25,7  | 24,8  | 24,0  | 23,3  | 22,1  | 21,1  | 20,3  | 19,6  | 19,0  |       |
| 2800                | 57,6 | 54,5                                                | 52,2 | 50,3 | 48,7 | 47,3 | 46,1 | 45,0 | 43,2 | 41,6  | 40,4  | 39,3  | 38,3  | 36,2  | 34,6  | 33,3  | 32,2  | 31,1  | 30,2  | 28,8  | 27,6  | 26,6  | 25,8  | 25,0  |       |
| 2900                | 65,6 | 62,8                                                | 60,5 | 58,6 | 56,9 | 55,5 | 54,3 | 53,2 | 51,3 | 49,7  | 48,3  | 47,1  | 46,0  | 43,7  | 41,9  | 40,5  | 39,2  | 38,1  | 37,1  | 35,4  | 34,1  | 32,9  | 31,9  | 31,0  |       |
| 3000                | 72,9 | 70,6                                                | 68,5 | 66,8 | 65,1 | 63,8 | 62,6 | 61,6 | 59,6 | 58,0  | 56,6  | 55,4  | 54,3  | 51,9  | 50,0  | 48,4  | 47,0  | 45,8  | 44,7  | 42,9  | 41,4  | 40,1  | 39,0  | 38,0  |       |

Таблица VII-18

Степень диссоциации двуокиси углерода, %

| $t, ^\circ\text{C}$ | Парциальное давление двуокиси углерода, $\text{кН/м}^2$ |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------|---------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                     | 2,94                                                    | 3,93 | 4,90 | 5,88 | 6,86 | 7,85 | 8,83 | 9,81 | 11,77 | 13,73 | 15,69 | 17,65 | 19,61 | 24,52 | 29,42 |
| 1500                | 0,6                                                     | 0,5  | 0,5  | 0,5  | 0,5  | 0,5  | 0,5  | 0,5  | 0,5   | 0,5   | 0,4   | 0,4   | 0,4   | 0,4   | 0,4   |
| 1600                | 2,2                                                     | 2,0  | 1,9  | 1,8  | 1,7  | 1,6  | 1,55 | 1,5  | 1,45  | 1,4   | 1,35  | 1,3   | 1,3   | 1,2   | 1,1   |
| 1700                | 4,1                                                     | 3,8  | 3,5  | 3,3  | 3,1  | 3,0  | 2,9  | 2,8  | 2,6   | 2,5   | 2,4   | 2,3   | 2,2   | 2,0   | 1,9   |
| 1800                | 6,9                                                     | 6,3  | 5,9  | 5,5  | 5,2  | 5,0  | 4,8  | 4,6  | 4,4   | 4,2   | 4,0   | 3,8   | 3,7   | 3,5   | 3,3   |
| 1900                | 11,1                                                    | 10,1 | 9,5  | 8,9  | 8,5  | 8,1  | 7,8  | 7,6  | 7,2   | 6,8   | 6,5   | 6,3   | 6,1   | 5,6   | 5,3   |
| 2000                | 18,0                                                    | 16,5 | 15,4 | 14,6 | 13,9 | 13,4 | 12,9 | 12,5 | 11,8  | 11,2  | 10,8  | 10,4  | 10,0  | 9,4   | 8,8   |
| 2100                | 25,9                                                    | 23,9 | 22,4 | 21,3 | 20,3 | 19,6 | 18,9 | 18,3 | 17,3  | 16,6  | 15,9  | 15,3  | 14,9  | 13,9  | 13,1  |
| 2200                | 37,6                                                    | 35,1 | 33,1 | 31,5 | 30,3 | 29,2 | 28,3 | 27,5 | 26,1  | 25,0  | 24,1  | 23,3  | 22,6  | 21,2  | 20,1  |
| 2300                | 47,6                                                    | 44,7 | 42,5 | 40,7 | 39,2 | 37,9 | 36,9 | 35,9 | 34,3  | 32,9  | 31,8  | 30,9  | 30,0  | 28,2  | 26,9  |
| 2400                | 59,0                                                    | 56,0 | 53,7 | 51,8 | 50,2 | 48,8 | 47,6 | 46,5 | 44,6  | 43,1  | 41,8  | 40,6  | 39,6  | 37,5  | 35,8  |
| 2500                | 69,1                                                    | 66,3 | 64,1 | 62,2 | 60,6 | 59,3 | 58,0 | 56,9 | 55,0  | 53,4  | 52,0  | 50,7  | 49,7  | 47,3  | 45,4  |
| 2600                | 77,7                                                    | 75,2 | 73,3 | 71,6 | 70,2 | 68,9 | 67,8 | 66,7 | 64,9  | 63,4  | 62,0  | 60,8  | 59,7  | 57,4  | 55,5  |
| 2700                | 84,4                                                    | 82,5 | 81,1 | 79,8 | 78,6 | 77,6 | 76,6 | 75,7 | 74,1  | 72,8  | 71,6  | 70,5  | 69,4  | 67,3  | 65,5  |
| 2800                | 89,6                                                    | 88,2 | 87,2 | 86,1 | 85,2 | 84,4 | 83,7 | 83,0 | 81,7  | 80,6  | 79,6  | 78,7  | 77,9  | 76,1  | 74,5  |
| 2900                | 93,2                                                    | 92,3 | 91,4 | 90,6 | 90,0 | 89,4 | 88,8 | 88,3 | 87,4  | 86,5  | 85,8  | 85,1  | 84,5  | 83,0  | 81,8  |
| 3000                | 95,6                                                    | 94,9 | 94,4 | 93,9 | 93,5 | 93,1 | 92,7 | 92,3 | 91,7  | 91,1  | 90,6  | 90,1  | 89,6  | 88,5  | 87,6  |

Таблица VII-19

Характеристика сжиженных газов

| Газ, химическая формула             | Плотность $\rho$      |                         | Температура кипения, $^\circ\text{C}$ | Теплоемкость газа, $\text{кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$ |                       | Объем паров на 1 кг жидкостн, $\text{м}^3$ | Теплота сгорания при 15 $^\circ\text{C}$ и 101325 $\text{Н/м}^2$ , $\text{кДж/м}^3$ | Пределы воспламеняемости (% газа) в смеси |        | Температура воспламенения, $^\circ\text{C}$ |
|-------------------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------|---------------------------------------------|
|                                     | газа, $\text{кг/м}^3$ | жидкостн, $\text{кг/л}$ |                                       | при постоянном давлении                                 | при постоянном объеме |                                            |                                                                                     | высший                                    | низший |                                             |
| Бутан ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) | 2,593                 | 0,582                   | +0,6                                  | 1,918                                                   | 1,733                 | 0,406                                      | 114718                                                                              | 8,4                                       | 1,9    | 475—550                                     |
| Пропан ( $\text{C}_3\text{H}_8$ )   | 1,967                 | 0,509                   | -44,5                                 | 1,989                                                   | 1,729                 | 0,535                                      | —                                                                                   | 9,5                                       | 2,3    | 510—580                                     |
| Этан ( $\text{C}_2\text{H}_6$ )     | 1,340                 | 0,446                   | -88,7                                 | 1,729                                                   | 1,415                 | 0,785                                      | 60675                                                                               | 12,5                                      | 3,2    | 530—605                                     |

## Состав и некоторые теплотехнические характеристики сжиженных газов

| Газ | Состав газов, % (объемн.) |                |                 |                               |                               |                                |                               |                               |                               |                               |                |
|-----|---------------------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|
|     | CO                        | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
| А   | —                         | —              | —               | 16,0                          | 14,4                          | 63,4                           | 0,2                           | 2,6                           | —                             | 0,3                           | 1,8            |
| Б   | —                         | —              | 0,3             | —                             | 3,5                           | 90,7                           | 0,1                           | 3,8                           | —                             | 0,5                           | 0,4            |
| В   | 0,2                       | —              | 1,5             | —                             | 12,7                          | 61,2                           | —                             | 14,5                          | 1,4                           | —                             | 8,5            |
| Г   | —                         | —              | —               | —                             | 10,9                          | 76,8                           | 1,0                           | 6,6                           | —                             | 2,3                           | —              |
| Д   | 0,4                       | 0,9            | 0,4             | —                             | 7,7                           | 71,1                           | 0,5                           | 11,5                          | —                             | 1,8                           | 4,9            |

Продолжение табл. VII-20

| Газ | Теплота сгорания Q <sub>н</sub> ,<br>кДж/м³ | Энтальпия сухих<br>продуктов сгорания<br>i <sub>сух</sub> , кДж/м³ | Жаропроизводитель-<br>ность g <sub>ж</sub> , °C | Энтальпия продуктов<br>сгорания i <sub>в</sub> ,<br>кДж/м³ | Отношение сухих<br>и влажных продуктов<br>сгорания B | Максимальное содержание<br>CO <sub>2</sub> в продуктах сгорания<br>CO <sub>2</sub> max, % |
|-----|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| А   | 84238                                       | 4187                                                               | 2120                                            | 3559                                                       | 0,85                                                 | 14,0                                                                                      |
| Б   | 92110                                       | 4144                                                               | 2100                                            | 3517                                                       | 0,85                                                 | 13,7                                                                                      |
| В   | 80248                                       | 4166                                                               | 2100                                            | 3517                                                       | 0,85                                                 | 13,8                                                                                      |
| Г   | 95040                                       | 4187                                                               | 2100                                            | 3538                                                       | 0,85                                                 | 14,4                                                                                      |
| Д   | 89179                                       | 4187                                                               | 2120                                            | 3559                                                       | 0,85                                                 | 14,0                                                                                      |

## ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НА «СЖАТЫЕ ГАЗЫ» (ПО ГОСТ 6763—53)

«Сжатые газы» отпускаются в баллоны под давлением  $19,6 \text{ МН/м}^2$  ( $200 \text{ кгс/см}^2$ ).

### Марки газов

Природный газ — из газовых и нефтяных скважин состава 70—98% (объемн.)  $\text{CH}_4$ , 1—10%  $\text{C}_2\text{H}_6$ , остальное — другие углеводороды;  $Q_{\text{в}} = 29300 \text{ кДж/м}^3$ .

Коксовый газ метанизированный, получаемый при извлечении водорода методом глубокого охлаждения, содержит  $\geq 65\% \text{ CH}_4$ ,  $Q_{\text{в}} = 25214 \text{ кДж/м}^3$ .

Коксовый газ обогащенный, получаемый после извлечения водорода методом глубокого охлаждения, состав:  $\geq 50\% \text{ CH}_4$ ,  $< 12\% \text{ H}_2$ ,  $Q_{\text{в}} = 22190 \text{ кДж/м}^3$ .

В «сжатых газах» должно содержаться,  $\text{г/м}^3$ :  $< 0,02 \text{ H}_2\text{S}$ ;  $< 0,01$  смолы и пыли;  $< 1,0\% \text{ O}_2$  ( $\leq 1,2\%$  для коксового обогащенного). В пересчете на  $\text{HCN} < 0,05 \text{ г/м}^3$  цианистых соединений. Содержание влаги в газе, находящемся под давлением в баллоне, зимой  $\leq 0,50 \text{ г/м}^3$ , летом  $\leq 7,0 \text{ г/м}^3$ .

## ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НА СЖИЖЕННЫЙ УГЛЕВОДОРОДНЫЙ ТОПЛИВНЫЙ ГАЗ (ПО ГОСТ 10196—82)

Сжиженные углеводородные топливные газы изготовляют трех марок:

1) пропан технический, состоящий в основном из пропана или из пропана и пропилена ( $\geq 93\%$ );

2) бутан технический, состоящий в основном из бутана или из бутана и бутиленов ( $\geq 93\%$ );

3) смесь пропана и бутана технических, состоящая в основном из пропана и бутана или из пропана, пропилена, бутана и бутиленов.

Содержание сероводорода в сжиженных газах не должно превышать  $0,05 \text{ г/м}^3$ . Запах газа должен ощущаться при содержании в воздухе  $0,5\%$  газа. Избыточное давление насыщенных паров при  $+45^\circ\text{C}$  для бутана технического должно составлять  $0,4\text{—}0,5 \text{ МН/м}^2$  ( $4,2\text{—}5,0 \text{ кгс/см}^2$ ), для пропана технического и смеси пропана и бутана технических  $< 1,57 \text{ МН/м}^2$ .

Жидкий остаток при  $+20^\circ\text{C}$  должен отсутствовать у пропана технического и составлять  $< 2,0\%$  (объемн.) у бутана технического и смеси пропана и бутана технических.

# ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОПЛИВА

Таблица VII-21

Характеристики нефтяного топлива (мазута) для транспортных и стационарных котельных установок и промышленных печей (по ГОСТ 10585—63 и 14298—69)

| Наименование показателей                                      | Мазут флотский |       | Мазут топочный |                                                                                    |          | Топливо для мартеновских печей |                |
|---------------------------------------------------------------|----------------|-------|----------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------|--------------------------------|----------------|
|                                                               | Ф5             | Ф12   | 40             | 100                                                                                | 200      | малосеринистое МП              | серинистое МПС |
| Условная вязкость, °ВУ (градусы Энглера) при температуре, °С: |                |       |                |                                                                                    |          |                                |                |
| 50 . . . . .                                                  | <5,0           | <12,0 | —              | —                                                                                  | —        | —                              | —              |
| 80 . . . . .                                                  | —              | —     | <8,0           | <15,5                                                                              | —        | —                              | <5,0—16,0      |
| 100 . . . . .                                                 | —              | —     | —              | —                                                                                  | <6,9—9,5 | —                              | —              |
| Вязкость динамическая, η, при температуре, °С:                |                |       |                |                                                                                    |          |                                |                |
| 10 . . . . .                                                  | 17,0           | —     | —              | —                                                                                  | —        | —                              | —              |
| 0 . . . . .                                                   | 27,0           | —     | —              | —                                                                                  | —        | —                              | —              |
| Зольность, % . . . . .                                        | ≤0,1           | ≤0,1  | ≤0,15          | ≤0,15                                                                              | ≤0,3     | ≤0,3                           | ≤0,3           |
| Содержание механических примесей, % . . . . .                 | <0,1           | <0,15 | <1,0           | <2,5                                                                               | <2,5     | <1,5                           | <1,5           |
| Содержание воды, % . . . . .                                  | <1,0           | <1,0  | <2,0           | <2,0                                                                               | <1,0     | <1,0                           | <1,0           |
| Содержание водорастворимых кислот и щелочей . . . . .         |                |       |                | Отсутствуют                                                                        |          |                                |                |
| Содержание серы, % . . . . .                                  | <2,0           | <0,8  |                | $\left\{ \begin{array}{l} <0,5^{*1} \\ <2,0^{*2} \\ <3,5^{*3} \end{array} \right.$ |          |                                | <0,5           |
|                                                               |                |       |                |                                                                                    |          |                                | <1,5           |

| Наименования показателей                                                             | Мазут флотский |            | Мазут топливный      |                      |                      | Топливо для мартеновских печей |               |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------|------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------------------|---------------|
|                                                                                      | Ф5             | Ф12        | 40                   | 100                  | 200                  | малосернистое МП               | сернистое МПС |
|                                                                                      |                |            |                      |                      |                      |                                |               |
| Содержание сероводорода . . . . .                                                    | Отсутствует    |            |                      | Не нормируется       |                      |                                |               |
| Содержание смолистых веществ, %                                                      | <50            | <50        | —                    | —                    | —                    | —                              | —             |
| Коксуемость, % . . . . .                                                             | —              | —          | —                    | —                    | —                    | >8,0                           | >8,0          |
| Температура вспышки, °С:                                                             |                |            |                      |                      |                      |                                |               |
| при определении в закрытом тигле . . . . .                                           | >80            | >90        | —                    | —                    | —                    | —                              | —             |
| при определении в открытом тигле . . . . .                                           | —              | —          | >90                  | >110                 | >140                 | >110                           | >110          |
| Температура застывания, °С:                                                          | <-5            | <-8        | <+10                 | <+25                 | <+36                 | <+25                           | <+25          |
| Температура застывания топлива вы-сокопарафинированных нефтей, °С .                  | —              | —          | <+25                 | <+42                 | <+42                 | —                              | —             |
| Низшая теплота сгорания в пересчете на сухое топливо (небракующая), кДж/кг . . . . . | { 41430<br>—   | 41430<br>— | 40720*1+2<br>38480*2 | 40510*1+2<br>38270*2 | 40300*1+2<br>38060*2 | 40460<br>—                     | 40190<br>—    |
| Плотность при 20°С, г/см³ . . . . .                                                  | —              | —          | —                    | <1,015               | —                    | <1,015                         | <1,015        |

Примечание. Для нефтяного топлива, подвергнутого водным перевозкам или слитого при подогреве острым паром, установлена норма показателя содержания воды: для топичного мазута 40 и 100 она равна < 5%, для флотского мазута Ф12 она составляет < 2%.

\*1 Для малосернистого. \*2 Для сернистого. \*3 Для высокосернистого.

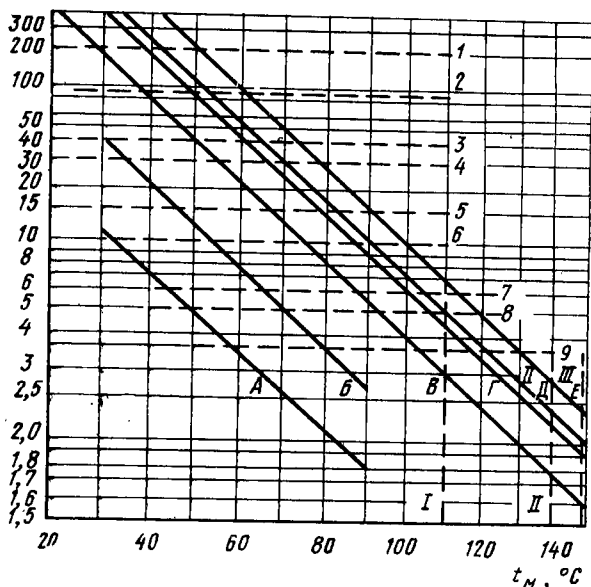
$\nu, \text{мм}^2/\text{с}$ 


Рис. 55. Зависимость кинематической вязкости  $\nu$  мазутов от их температуры  $t_M$  с указанием эксплуатационных пределов параметров:

1 — максимальная вязкость для винтовых и шестеренчатых насосов; 2 — то же, для поршневых насосов; 3 — средняя вязкость для подачи насосами и для слива; 4 — максимальная вязкость для центробежных насосов большой производительности; 5 — то же, для ротационных и паровых форсунок и в рециркуляционной системе; 6 — то же, для воздушных форсунок высокого и низкого давления; 7 — предельная вязкость для механических форсунок и рекомендуемая для паровых; 8 — рекомендуемая вязкость для воздушных форсунок; 9 — то же, для механических форсунок; I — максимальная температура мазута в подогревателе; II — то же, для пара; III — температура подогревателя, при которой начинается осаждение углерода (0,5 мм в месяц); А — мазут Ф5; Б — мазут Ф12; В — мазут 40; Г — мазут 100; Д — мазут МП; Е — мазут 200

Таблица VII-22

Соотношения между различными единицами вязкости

| Условная вязкость, $^{\circ}\text{ВУ}$ (градусы Энглера) | Кинематическая вязкость $\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$ | Секунды по универсальному вискозиметру Сейболта | Секунды по вискозиметру Сейболта—Фурола | Секунды по вискозиметру Редвуда № 1 | Секунды по вискозиметру Редвуда № 2 |
|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1,2                                                      | 2,9                                                           | 36                                              | —                                       | 33                                  | —                                   |
| 1,4                                                      | 5,0                                                           | 43                                              | —                                       | 38                                  | —                                   |
| 1,6                                                      | 7,4                                                           | 50                                              | —                                       | 45                                  | —                                   |
| 1,8                                                      | 9,4                                                           | 57                                              | 12                                      | 51                                  | —                                   |
| 2,0                                                      | 11,2                                                          | 64                                              | 13                                      | 57                                  | —                                   |
| 2,2                                                      | 13,0                                                          | 71                                              | 13                                      | 62                                  | —                                   |
| 2,4                                                      | 14,7                                                          | 78                                              | 13                                      | 68                                  | —                                   |
| 2,6                                                      | 16,6                                                          | 85                                              | 14                                      | 74                                  | —                                   |
| 2,8                                                      | 18,3                                                          | 91                                              | 14                                      | 80                                  | —                                   |
| 3,0                                                      | 20,0                                                          | 98                                              | 15                                      | 85                                  | —                                   |
| 3,2                                                      | 21,7                                                          | 104                                             | 15                                      | 91                                  | 10                                  |
| 3,4                                                      | 23,4                                                          | 111                                             | 16                                      | 97                                  | 11                                  |
| 3,6                                                      | 25,0                                                          | 118                                             | 16                                      | 103                                 | 12                                  |
| 3,8                                                      | 26,6                                                          | 125                                             | 17                                      | 109                                 | 12                                  |
| 4,0                                                      | 28,1                                                          | 131                                             | 17                                      | 115                                 | 13                                  |
| 4,2                                                      | 29,7                                                          | 138                                             | 18                                      | 120                                 | 13                                  |
| 4,4                                                      | 31,3                                                          | 145                                             | 18                                      | 126                                 | 14                                  |
| 4,6                                                      | 31,9                                                          | 152                                             | 19                                      | 132                                 | 15                                  |
| 4,8                                                      | 32,4                                                          | 159                                             | 20                                      | 138                                 | 16                                  |
| 5,0                                                      | 32,9                                                          | 165                                             | 20                                      | 144                                 | 16                                  |
| 6,0                                                      | 43,7                                                          | 200                                             | 23                                      | 173                                 | 19                                  |
| 7,0                                                      | 51,4                                                          | 235                                             | 26                                      | 202                                 | 22                                  |
| 8,0                                                      | 59,1                                                          | 269                                             | 29                                      | 231                                 | 25                                  |
| 9,0                                                      | 66,8                                                          | 305                                             | 32                                      | 259                                 | 28                                  |
| 10,0                                                     | 74,3                                                          | 339                                             | 35                                      | 288                                 | 31                                  |
| 11,0                                                     | 80,9                                                          | 374                                             | 38                                      | 317                                 | 34                                  |
| 12,0                                                     | 89,4                                                          | 409                                             | 42                                      | 345                                 | 37                                  |
| 13,0                                                     | 96,9                                                          | 443                                             | 45                                      | 373                                 | 41                                  |
| 14,0                                                     | 104,5                                                         | 476                                             | 48                                      | 403                                 | 44                                  |
| 15,0                                                     | 111,8                                                         | 509                                             | 52                                      | 432                                 | 48                                  |

| Условная вязкость, °ВУ (градусы Энглера) | Кинематическая вязкость $\nu \cdot 10^6$ , $\text{м}^2/\text{с}$ | Секунды по универсальному вискозиметру Сейболта | Секунды по вискозиметру Сейболта—Фуrola | Секунды по вискозиметру Редвуда № 1 | Секунды по вискозиметру Редвуда № 2 |
|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 20,0                                     | 150                                                              | 675                                             | 70                                      | 570                                 | 62                                  |
| 25,0                                     | 187                                                              | 850                                             | 86                                      | 720                                 | 78                                  |
| 30,0                                     | 224                                                              | 1020                                            | 104                                     | 860                                 | 94                                  |
| 35,0                                     | 262                                                              | 1190                                            | 120                                     | 1010                                | 110                                 |
| 40,0                                     | 299                                                              | 1360                                            | 137                                     | 1150                                | 126                                 |
| 45,0                                     | 336                                                              | 1530                                            | 153                                     | 1300                                | 142                                 |
| 50,0                                     | 373                                                              | 1700                                            | 170                                     | 1440                                | 157                                 |
| 60,0                                     | 448                                                              | 2050                                            | 205                                     | 1730                                | 188                                 |
| 70,0                                     | 525                                                              | 2375                                            | 238                                     | 2020                                | 220                                 |
| 80,0                                     | 600                                                              | 2720                                            | 272                                     | 2310                                | 251                                 |
| 90,0                                     | 675                                                              | 3065                                            | 307                                     | 2590                                | 282                                 |
| 100,0                                    | 750                                                              | 3410                                            | 341                                     | 2880                                | 314                                 |

Таблица VII-23

Некоторые теплотехнические характеристики жидкого топлива

| Топливо                                | $\eta^p$ , % | $Q_{\text{н}}^p$ , кДж/кг | $V_{\text{с.г.}}$ , $\text{м}^3/\text{кг}$ | $t_{\text{с.г.}}$ , $\text{м}^3/\text{кг}$ | $RO_{\text{max}}$ , % |
|----------------------------------------|--------------|---------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------|
| Бензин . . . . .                       | 0            | 43732                     | 10,68                                      | 4103                                       | 14,8                  |
| Керосин . . . . .                      | 0            | 42915                     | 10,49                                      | 4103                                       | 15,2                  |
| Дизельное автотракторное топливо . .   | 0            | 42622                     | 10,44                                      | 4082                                       | 15,4                  |
| Соляровое масло . .                    | 0            | 42329                     | 10,36                                      | 4082                                       | 15,6                  |
| Моторное топливо .                     | 1,5          | 41282                     | 10,15                                      | 4061                                       | 15,6                  |
| Мазут малосернистый (марка): . . . . . |              |                           |                                            |                                            |                       |
| Ф5, Ф12 . . . . .                      | 1            | 40863                     | 10,20                                      | 4040                                       | 15,7                  |
| 40 . . . . .                           | 2            | 39775                     | 10,0                                       | 4040                                       | 15,9                  |
| 100, МП . . . . .                      | 3            | 39105                     | 9,80                                       | 4019                                       | 16,2                  |
| 200 . . . . .                          | 4            | 38477                     | 9,65                                       | 4019                                       | 16,4                  |
| Мазут сернистый (марка) . . . . .      |              |                           |                                            |                                            |                       |
| 40 . . . . .                           | 1            | 39565                     | 9,95                                       | 4061                                       | 15,9                  |
| 100 . . . . .                          | 2            | 38937                     | 9,78                                       | 4061                                       | 16,0                  |
| 200 . . . . .                          | 3            | 38309                     | 9,64                                       | 4040                                       | 16,2                  |

Таблица VII-24

Элементарный состав, теплота сгорания и расчетные характеристики смол  
(средние данные)

| Смола           | Способ получения | Плотность при 20°С, т/м³ | Вязкость условная ВУ <sub>50</sub> | Элементарный состав, % |                |                |                                          | Теплотехнические расчетные характеристики                  |                                   |                                                         |                                                              |                                            |                                 |
|-----------------|------------------|--------------------------|------------------------------------|------------------------|----------------|----------------|------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------|
|                 |                  |                          |                                    | горячая масса          |                |                | теплота сгорания Q <sub>н</sub> , кДж/кг | теоретическое количество воздуха L <sub>теор</sub> , м³/кг | содержание RO <sub>2</sub> max, % | объем сухих продуктов сгорания V <sub>сух</sub> , м³/кг | содержание водяных паров V <sub>H<sub>2</sub>O</sub> , м³/кг | жаропроизводительность t <sub>ж</sub> , °С |                                 |
|                 |                  |                          |                                    | C <sup>r</sup>         | H <sup>r</sup> | S <sup>r</sup> |                                          |                                                            |                                   |                                                         |                                                              |                                            | N <sup>r</sup> + O <sup>r</sup> |
| Каменноугольная | Коксование       | 1,04—1,2                 | 24                                 | 90                     | 7              | 1              | 2                                        | 35588                                                      | 9,5                               | 17,75                                                   | 9,50                                                         | 1,0                                        | 2040                            |
|                 | Газификация      | 1,1—1,2                  | 55                                 | 83                     | 7              | 2              | 8                                        | 33494                                                      | 8,97                              | 17,80                                                   | 8,76                                                         | 1,0                                        | 2060                            |
|                 | Полукоксование   | 0,98—1,1                 | 10                                 | 85                     | 11             | 1              | 3                                        | 37263                                                      | 9,97                              | 16,20                                                   | 9,80                                                         | 1,45                                       | 2000                            |
| Торфяная        | Газификация      | 0,95—1,1                 | 26                                 | 85                     | 9              | 1              | 10                                       | 33494                                                      | 8,97                              | 17,10                                                   | 8,73                                                         | 1,20                                       | 2000                            |
|                 | Полукоксование   | 0,96                     | 5                                  | 87                     | 10,3           | 0,2            | 2                                        | 37681                                                      | 10,05                             | 16,50                                                   | 9,80                                                         | 1,38                                       | 2060                            |
| Сланцевая       | Туннельная       | 0,96                     | 1,6                                | 84                     | 10,5           | 0,5            | 5                                        | 36425                                                      | 9,74                              | 16,50                                                   | 9,52                                                         | 1,39                                       | 2000                            |
|                 | Газификация      | 1,00                     | 4,7                                | 83                     | 10             | 1              | 6                                        | 35588                                                      | 9,51                              | 16,60                                                   | 9,35                                                         | 1,34                                       | 2000                            |
| Древесная       | Сухая перегонка  | 1—1,2                    | 20                                 | 72                     | 8,75           | —              | 19                                       | 30982                                                      | 8,27                              | 17,30                                                   | 7,8                                                          | 1,16                                       | 2080                            |

\* Балласт:  $\text{Ш}^P \approx 5$ ;  $A^P \approx 1$ .

Таблица VII-25

Элементарный состав, теплота сгорания и расчетные характеристики смол и других жидких продуктов, могущих замещать мазут (данные ВНИИМТ)\*1

| Наименование жидких продуктов (смолы, масла и т. д.) | Исходное сырье                                                   | Плотность при 20°С, г/м³ | Вязкость условная |        |       | Температура, °С |               |            | Элементарный состав (средние данные), % |                |                                 |                |                |                             | Теплота сгорания, кДж/кг    |                |
|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------|--------|-------|-----------------|---------------|------------|-----------------------------------------|----------------|---------------------------------|----------------|----------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|
|                                                      |                                                                  |                          | ВУ₉₀              | ВУ₇₅   | ВУ₁₀₀ | вспышка         | воспламенение | застывание | горючая масса                           |                |                                 | балласт        |                | Q <sub>H</sub> <sup>Г</sup> | Q <sub>H</sub> <sup>Р</sup> |                |
|                                                      |                                                                  |                          |                   |        |       |                 |               |            | С <sup>Г</sup>                          | H <sup>Г</sup> | N <sup>Г</sup> + O <sup>Г</sup> | S <sup>Г</sup> | W <sup>Р</sup> |                             |                             | A <sup>Р</sup> |
| Смола                                                | Челябинский уголь                                                | —                        | 22,53             | 6,98   | 2,83  | —               | —             | —          | 78,90                                   | 9,20           | 11,68                           | 0,22           | 3,6            | 0,14                        | 34960                       | 33746          |
|                                                      | Кизеловский уголь, сырье Губахинского коксохимического комбината | 1,155                    | 6,77              | 2,10   | 1,40  | 107             | —             | 18         | 84,98                                   | 5,70           | 6,64                            | 2,68           | Следы          | 0,01                        | 34893                       | 34545          |
|                                                      | Кизеловский уголь Нижне-Тагильского коксохимического завода      | —                        | —                 | —      | —     | —               | —             | —          | 86,69                                   | 4,84           | 7,04                            | 1,43           | То же          | 0,57                        | 36174                       | 36048          |
| Пек                                                  | вода                                                             | —                        | А                 | Б      | В     | —               | —             | —          | —                                       | —              | —                               | —              | —              | —                           | —                           | —              |
|                                                      | Нижне-Тагильского торфохимического завода                        | 0,917*2                  | 1,68              | 1,22   | 1,08  | 67              | 89            | 21         | 85,73                                   | 10,83          | 3,06                            | 0,38           | 0,9            | 0,4                         | 40294                       | 39201          |
|                                                      | вода                                                             | —                        | —                 | —      | —     | —               | —             | —          | —                                       | —              | —                               | —              | —              | —                           | —                           | —              |
| Нейтральное масло                                    | Нижне-Тагильского торфохимического завода                        | —                        | —                 | —      | —     | —               | —             | —          | —                                       | —              | —                               | —              | —              | —                           | —                           | —              |
|                                                      | вода                                                             | —                        | —                 | —      | —     | —               | —             | —          | —                                       | —              | —                               | —              | —              | —                           | —                           | —              |
|                                                      | Нижне-Тагильского торфохимического завода                        | 0,971                    | 1,67              | 1,38   | 1,28  | 75              | 93            | 7          | 81,35                                   | 9,61           | 8,74                            | 0,30           | 0,10           | 0,10                        | 36978                       | 36789          |
| Парафиновое масло                                    | вода                                                             | —                        | —                 | —      | —     | —               | —             | —          | —                                       | —              | —                               | —              | —              | —                           | —                           | —              |
|                                                      | Нижне-Тагильского торфохимического завода                        | —                        | —                 | —      | —     | —               | —             | —          | —                                       | —              | —                               | —              | —              | —                           | —                           | —              |
|                                                      | вода                                                             | —                        | —                 | —      | —     | —               | —             | —          | —                                       | —              | —                               | —              | —              | —                           | —                           | —              |
| Смола                                                | Нижне-Тагильского торфохимического завода                        | 1,159                    | —                 | 27,0*3 | 6,37  | 139             | —             | 5          | 91,61                                   | 4,58           | 2,46                            | 1,35           | 13,90          | 0,41                        | 35219                       | 29873          |

\*1 Всесоюзный научно-исследовательский институт металлургической теплотехники. \*2 При 15°C. \*3 Не течет. А — ВУ<sub>100</sub>, не течет. Б — ВУ<sub>75</sub>, не течет. В — ВУ<sub>90</sub>, течет по каплям.

Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  мазута топочного 40:

|                                                    |       |       |       |       |       |
|----------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $t, ^\circ\text{C}$                                | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    |
| $\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ | 0,135 | 0,135 | 0,133 | 0,131 | 0,130 |

Средняя теплоемкость при изменении температуры в интервале 20—100°С составляет для мазутов 1,88—2,28 и для смол 2,09—2,43 кДж/(кг·°С).

Теплота плавления мазутов и смол равна соответственно 167—251 и 209—293 кДж/кг.

Таблица VII-26

Средние теплоемкости  $c_{\text{ср}}$ , кДж/(м³·°С), и энтальпии  $i$ , кДж/м³, продуктов сгорания нефти, нефтяных масел и природного газа

| Избыток воздуха, % | Температура, °С |              |              |              |               |
|--------------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
|                    | 0               | 200          | 400          | 600          | 800           |
| 0                  | 1,365; 0        | 1,398; 279,7 | 1,432; 572,8 | 1,465; 879,2 | 1,499; 1199,1 |
| 20                 | 1,352; 0        | 1,382; 276,3 | 1,415; 566,1 | 1,444; 866,7 | 1,478; 1182,4 |
| 40                 | 1,348; 0        | 1,377; 275,5 | 1,407; 562,7 | 1,436; 861,6 | 1,469; 1175,7 |
| 100                | 1,331; 0        | 1,357; 271,3 | 1,382; 552,7 | 1,407; 844,1 | 1,432; 1145,5 |

Продолжение табл. VII-6

| Избыток воздуха, % | Температура, °С |               |               |               |
|--------------------|-----------------|---------------|---------------|---------------|
|                    | 1000            | 1200          | 1400          | 1600          |
| 0                  | 1,537; 1536,6   | 1,570; 1884,1 | 1,604; 2244,9 | 1,637; 2619,3 |
| 20                 | 1,507; 1507,2   | 1,541; 1848,9 | 1,574; 2203,9 | 1,604; 2565,7 |
| 40                 | 1,499; 1498,9   | 1,528; 1833,8 | 1,562; 2186,4 | 1,591; 2546,6 |
| 100                | 1,461; 1461,2   | 1,486; 1783,6 | 1,511; 2116,0 | 1,537; 2458,5 |

Продолжение табл. VII-6

| Избыток воздуха, % | Температура, °С |               |               |               |
|--------------------|-----------------|---------------|---------------|---------------|
|                    | 1800            | 2000          | 2200          | 2500          |
| 0                  | 1,671; 3006,9   | 1,708; 3416,4 | 1,742; 3831,8 | 1,792; 4479,9 |
| 20                 | 1,637; 2946,7   | 1,666; 3332,7 | 1,699; 3739,7 | 1,746; 4364,7 |
| 40                 | 1,620; 2916,5   | 1,649; 3299,2 | 1,683; 3702,8 | 1,729; 4322,9 |
| 100                | 1,562; 2811,0   | 1,587; 3173,6 | 1,616; 3555,4 | 1,658; 4144,9 |

## ТВЕРДЫЕ ТОПЛИВА

### Качества ископаемых углей и горючих сланцев СССР

ГОСТом предусмотрена классификация углей отдельных бассейнов и месторождений по качеству (маркировка) и размерам кусков. В основу маркировки каменных углей положены две характеристики: выход летучих веществ на горючую массу  $V^r$ ,  $V^r_6$  и толщина пластического слоя  $y$  или спекаемость.

Если толщина пластического слоя  $y$  менее 6 мм, то вводится характеристика нелетучего остатка; при выходе летучих веществ менее 9% (полуантрациты и антрациты) — теплота сгорания горючей массы ( $Q^r_6$ ) в бомбе.

Ниже приведена также и старая маркировка по отдельным шахтам, которая может служить техническими условиями.

Бурые угли разделяют на группы по содержанию в них рабочей влаги  $W^p$ , %:

|                     |       |
|---------------------|-------|
| Группа Б1 . . . . . | >40   |
| Группа Б2 . . . . . | 30—40 |
| Группа Б3 . . . . . | <30   |

Для углей за горючую массу условно принята разность  $100 - W - A$ , где 100 — рабочая или аналитическая масса топлива.

Для пересчета элементарного состава, выхода летучих веществ и теплоты сгорания в бомбе с одной массы топлива на другую рекомендуются множители, приведенные в табл. VII-27.

Т а б л и ц а VII-27

Множители для пересчета результатов анализа угля

| Масса, с которой сделан пересчет | Множители для пересчета на массу |                               |                         |                               |
|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------|
|                                  | рабочую                          | аналитическую                 | сухую                   | горючую                       |
| Рабочая . . . . .                | 1                                | $\frac{100 - W^a}{100 - W^p}$ | $\frac{100}{100 - W^p}$ | $\frac{100}{100 - W^p - A^p}$ |
| Аналитическая . . . .            | $\frac{100 - W^p}{100 - W^a}$    | 1                             | $\frac{100}{100 - W^a}$ | $\frac{100}{100 - W^a - A^a}$ |
| Сухая . . . . .                  | $\frac{100 - W^p}{100}$          | $\frac{100 - W^a}{100}$       | 1                       | $\frac{100}{100 - A^c}$       |
| Горючая . . . . .                | $\frac{100 - W^p - A^p}{100}$    | $\frac{100 - W^a - A^a}{100}$ | $\frac{100 - A^c}{100}$ | 1                             |

Пересчет низшей теплоты сгорания с горючей массы на рабочую выполняют по формуле

$$Q_n^p = Q_n^r \frac{100 - W^p - A^p}{100} - 6 W^p.$$

Характеристика качества горючих сланцев приведена по теплоте сгорания сухой массы ( $Q_s^\circ$ ), которая является для них расчетным показателем.

Ниже приведены классификация, маркировка и группировка углей Донецкого бассейна. Для углей других месторождений данные имеют близкие значения.

Средние данные о качестве углей приведены в табл. VII-28.

Таблица VII-28

Классификация каменных углей антрацита Донецкого бассейна (по ГОСТ 8180—59)

| Наименование марки    | Условное обозначение |            | Показатели               |                                 |                     | Характеристика нелетучего остатка           |
|-----------------------|----------------------|------------|--------------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------------------------------|
|                       | марки                | группы     | $V^r$ , %                | $V_{об}^r$ , см <sup>3</sup> /г | $\mu$ , мм          |                                             |
| Длиннопламенный       | Д                    | —          | 37 и более               | —                               | —                   | Порошкообразный, слипшийся, слабо-спекшийся |
| Газовый               | Г                    | Г6<br>Г16  | 35 и более<br>35 и более | —<br>—                          | 6—15<br>16—25       | —                                           |
| Жирный                | Ж                    | Ж13<br>Ж21 | 27—35<br>27—35           | —                               | 13—20<br>21 и более | —                                           |
| Коксовый              | К                    | КЖ<br>К14  | 18—27<br>18—27           | —                               | 21 и более<br>14—20 | —                                           |
| Отощенный спекающийся | ОС                   | ОС6<br>ОС  | 14—22<br>14—22           | —                               | 6—13<br><6          | Спекшийся, без порошка                      |
| Тощий                 | Т                    | —          | 9—17                     | —                               | —                   | Порошкообразный, слипшийся, слабо-спекшийся |
| Полуантрацит          | ПА                   | —          | <9                       | 220—330                         | —                   | —                                           |
| Антрацит              | А                    | —          | <9                       | <220                            | —                   | —                                           |

Таблица VII-29

Классификация углей и антрацита Донецкого бассейна по размерам кусков (по ГОСТ 8180—59)

| Класс   | Условное обозначение марок — классов |    |    | Размер кусков, мм |
|---------|--------------------------------------|----|----|-------------------|
|         | Д                                    | Г  | А  |                   |
| Плитный | —                                    | —  | АП | <100              |
| Крупный | ДК                                   | ГК | АК | 50—100            |
| Орех    | ДО                                   | ГО | АО | 25—50             |

| Класс   | Условное обозначение марок—классов |    |    | Размер кусков, мм |
|---------|------------------------------------|----|----|-------------------|
|         | Д                                  | Г  | А  |                   |
| Мелкий  | ДМ                                 | ГМ | АМ | 13—25             |
| Семечко | ДС                                 | ГС | АС | 6—13              |
| Штыб    | ДШ                                 | ГШ | АШ | <6                |

Примечания: 1. При рассортировке сухого антрацита для класса АШ устанавливается размер кусков менее 3 мм взамен менее 6 мм и вводится дополнительный класс З (зубок) с размером кусков 3—6 мм.

2. Для углей марок Д и Г и антрацита при поставке их электростанциям и другим потребителям для сжигания в пылевидном состоянии, а также при повышенной их влажности устанавливается класс с размером кусков менее 13 мм, условно обозначаемый ДСШ, ГСШ и АСШ (семечко со штыбом), взамен классов 6—13 мм и менее 6 мм. При поставке для коксования угля марки Г выделяется класс размером кусков менее 25 мм, условно обозначаемый ГМСШ, взамен классов 13—25, 6—13 мм и менее 6 мм.

3. В тех случаях, когда производить рассортировку не представляется возможным (высокая влажность, незначительная механическая прочность) или экономически нецелесообразно, допускается выпуск марок Д, Г и антрацита также и в рядовом виде.

### Группировка углей и антрацита Донецкого бассейна по зольности (по ГОСТ 863—70 и др.)

|                     |        |        |          |            |
|---------------------|--------|--------|----------|------------|
| Группа              | 1      | 2      | 3        | 4          |
| Зольность $A_c$ , % | >8     | >8—10  | >10—12,5 | >12,5—16,0 |
| Группа              | 5      | 6      | 7        | 8          |
| Зольность $A_c$ , % | >16—20 | >20—25 | >25—31,5 | >31,5—37,5 |

### Группировка углей Донецкого бассейна для коксования по содержанию серы $S_{об}$ (по ГОСТ 8181—56)

|              |         |           |           |
|--------------|---------|-----------|-----------|
| Группа       | 1       | 2         | 3         |
| $S_{об}$ , % | <0,50   | 1,55—1,90 | 1,95—2,35 |
| Группа       | 4       | 5         | 6         |
| $S_{об}$ , % | 2,4—3,0 | 3,05—3,75 | 3,8—4,5   |

### Маркировка углей Донецкого бассейна (действовавшая до утверждения ГОСТ 8180—59)

| Марка и ее условное обозначение | $V_r$ , % |
|---------------------------------|-----------|
| Длиннопламенный (Д)             | >42,0     |
| Газовый (Г)                     | 35,0—44,0 |
| Паровичный жирный (ПЖ)          | 26,0—35,0 |
| Коксовый (К)                    | 18,0—26,0 |
| Паровичный спекающийся (ПС)     | 12,0—18,0 |
| Тощий (Т)                       | <17,0     |

### Кокс

Основным потребителем кокса является черная металлургия (доменное производство). Для выплавки чугуна расходуется ~84% производимого в стране кокса. Литейное производство потребляет ~6%, цветной металлургией расходуется ~4% кокса. Для кокса, изготовляемого для различных видов потребления, имеются соответствующие ГОСТы. Нормы качества доменного кокса из углей Донецкого бассейна и углей восточных районов приведены на с. 184—185, нормы качества кокса литейного каменноугольного на с. 185.

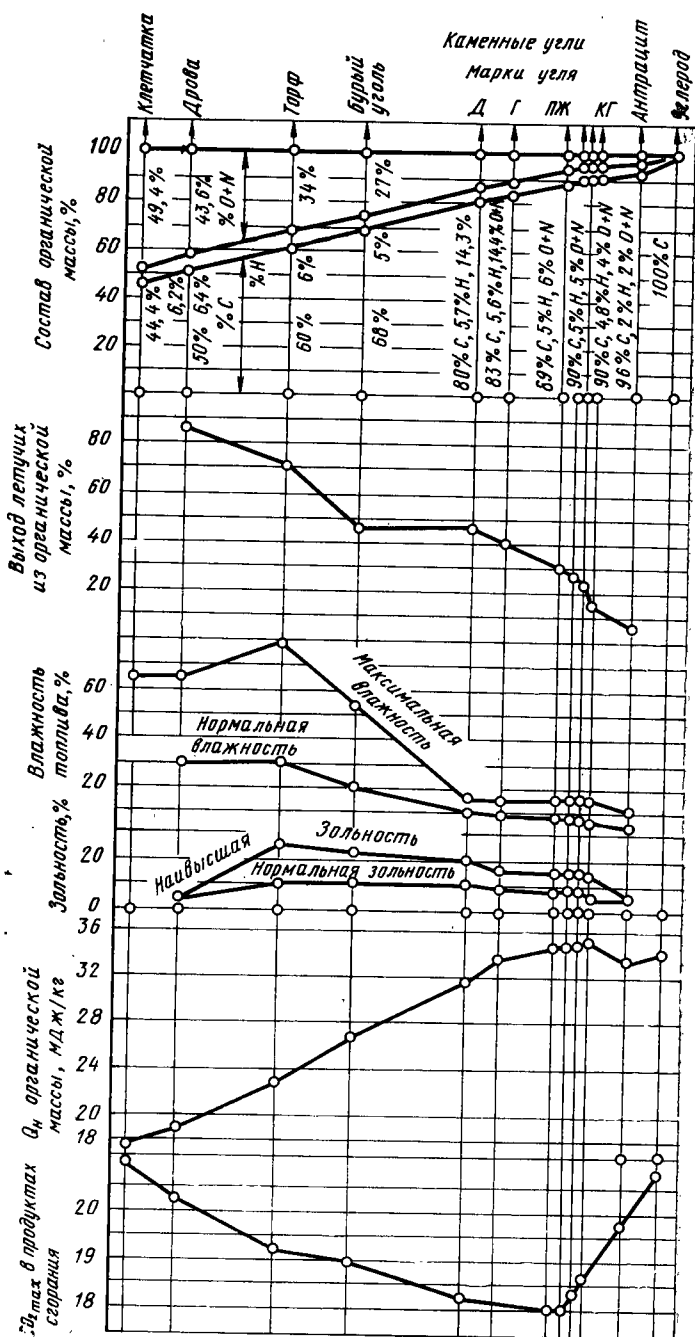


Рис. 56. Физико-химические характеристики твердого топлива

Таблица VII-30

## Физико-химические характеристики углей Донецкого бассейна

| Уголь                             | Марка          | Содержание влаги, % |               | Состав сухой массы топлива, % |                                 |                 |                |                |                | Состав горючей массы топлива, % |                |                |                |                |                |
|-----------------------------------|----------------|---------------------|---------------|-------------------------------|---------------------------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                                   |                |                     |               | A <sup>c</sup>                | (CO <sub>2</sub> ) <sub>K</sub> | S <sub>об</sub> | S <sub>c</sub> | S <sub>K</sub> | S <sub>K</sub> | S <sub>op</sub>                 | C <sup>r</sup> | H <sup>r</sup> | N <sup>r</sup> | O <sup>r</sup> | V <sup>r</sup> |
|                                   |                | аналитическая пробы | рабочей массы |                               |                                 |                 |                |                |                |                                 |                |                |                |                |                |
| Длинноплемный                     | Д              | 4,5                 | 13,0          | 16,0                          | —                               | 4,5             | 0,2            | 2,4            | 2,9            | 2,3                             | 76,5           | 5,5            | 1,6            | 11,2           | 43,0           |
| Газовый                           | Г              | 3,0                 | 7,0           | 17,0                          | —                               | 3,7             | 0,1            | 2,1            | 2,5            | 1,8                             | 80,5           | 5,4            | 1,5            | 8,3            | 39,9           |
| Паровальный жирный                | ПЖ             | 1,0                 | 5,0           | 18,0                          | —                               | 3,0             | 0,1            | 2,0            | 2,4            | 1,1                             | 84,0           | 2,4            | 1,5            | 5,8            | 32,0           |
| Коксовый                          | К              | 1,3                 | 5,0           | 17,5                          | —                               | 3,0             | 0,1            | 2,1            | 2,5            | 1,0                             | 87,0           | 4,8            | 1,5            | 3,2            | 22,0           |
| Паровальный слабообогатенный      | ПС             | 0,8                 | 5,0           | 19,0                          | —                               | 2,5             | 0,1            | 1,6            | 2,0            | 1,0                             | 88,5           | 4,5            | 1,5            | 2,5            | 16,0           |
| Тошый                             | Т              | 1,0                 | 5,8           | 17,0                          | 0,8                             | 2,9             | 0,1            | 1,9            | 2,3            | 1,1                             | 89,5           | 4,2            | 1,5            | 1,4            | 13,0           |
| Антрацит                          | А              | 2,0                 | 5,8           | 14,0                          | 0,5                             | 2,0             | 0,1            | 1,2            | 1,4            | 0,8                             | 93,5           | 2,0            | 0,8            | 1,5            | 3,5            |
| Промпродукт обогатительных фабрик | { ПЖ<br>К<br>Т | 1,8                 | 11,0          | 40,0                          | —                               | 3,5             | 0,2            | 2,7            | 4,5            | 1,0                             | 77,5           | 5,5            | 1,5            | 10,0           | 43,0           |
|                                   |                | 1,0                 | 9,0           | 40,0                          | —                               | 4,3             | 0,2            | 2,5            | 5,8            | 1,0                             | 80,0           | 5,4            | 1,7            | 6,1            | 34,0           |
|                                   |                | 1,0                 | 9,0           | 40,0                          | —                               | 3,3             | 0,2            | 2,5            | 4,2            | 1,0                             | 83,5           | 5,1            | 1,7            | 4,5            | 25,0           |
|                                   |                | 1,4                 | 8,0           | 40,0                          | —                               | 3,3             | 0,2            | 2,5            | 4,1            | 1,4                             | 84,5           | 4,5            | 1,5            | 4,0            | 19,0           |

Продолжение табл. VII-30

| Уголь                             | Марка          | Нелетучий остаток                  | Теплота сгорания, кДж/кг |                | Лабораторный коэффициент размолоспособности K <sub>л.о</sub> | Температура плавления золы, °C   |                                   |                                      |                                |
|-----------------------------------|----------------|------------------------------------|--------------------------|----------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
|                                   |                |                                    |                          |                |                                                              | начала деформации t <sub>1</sub> | начала размягчения t <sub>2</sub> | начала жидкоплавления t <sub>3</sub> | конца состояния t <sub>4</sub> |
|                                   |                |                                    | Q <sub>с</sub>           | Q <sub>н</sub> |                                                              |                                  |                                   |                                      |                                |
| Длинноплемный                     | Д              | Порошкообразный или слабоспекшийся | 32657                    | 30899          | 1,10                                                         | 1050                             | 1150                              | 1200                                 | 1200                           |
| Газовый                           | Г              | Спекшийся                          | 33913                    | 32238          | 1,15                                                         | 1050                             | 1150                              | 1220                                 | 1220                           |
| Паровальный жирный                | ПЖ             | Спекшийся                          | 35378                    | 33829          | 1,50                                                         | 1100                             | 1120                              | 1200                                 | 1200                           |
| Коксовый                          | К              | Спекшийся                          | 35378                    | 33829          | 1,50                                                         | 1100                             | 1120                              | 1200                                 | 1200                           |
| Паровальный слабообогатенный      | ПС             | Спекшийся                          | 35797                    | 34332          | 1,30                                                         | 1080                             | 1120                              | 1190                                 | 1190                           |
| Тошый                             | Т              | Спекшийся                          | 36006                    | 34667          | 1,30                                                         | 1080                             | 1120                              | 1190                                 | 1190                           |
| Антрацит                          | А              | Спекшийся                          | 36006                    | 34667          | 1,80                                                         | 1080                             | 1230                              | 1260                                 | 1260                           |
| Промпродукт обогатительных фабрик | { ПЖ<br>К<br>Т | Спекшийся                          | 34206                    | 33369          | —                                                            | 980—1020                         | 1050—1120                         | 1090—1150                            | 1090—1150                      |
|                                   |                | Слабоспекшийся и порошкообразный   | 33285                    | 31443          | 1,2                                                          | 1080—1140                        | 1200—1350                         | 1350—1400                            | 1350—1400                      |
|                                   |                | Спекшийся                          | 34332                    | 32406          | 1,5                                                          | 1010—1160                        | 1180—1390                         | 1200—1420                            | 1200—1420                      |
|                                   |                | Порошкообразный                    | 34750                    | 33034          | 1,5                                                          | 1100                             | 1350                              | 1370                                 | 1370                           |

Элементарный состав кокса, получаемого из углей различных месторождений и угольных шахт, практически одинаков. Вследствие этого теплота сгорания органической массы кокса относительно устойчива и составляет ~33500 кДж/кг. Влажность кокса колеблется в пределах 2—3% и зольность 9—10%. Эти параметры являются определяющими для теплоты сгорания товарного кокса, которая в среднем равна 29300 кДж/кг.

Средняя теплоемкость кокса уменьшается с увеличением зольности кокса и возрастает с повышением конечной температуры коксования (см. табл. VII-34).

Коэффициент теплопроводности кокса выше, чем углей. При 20°C теплопроводность монолитного куска кокса  $\lambda = 0,465—0,815$  Вт/(м·°C).

С повышением температуры теплопроводность кокса возрастает, и в области температур конца коксования приближается к 1,75—2,0 Вт/(м·°C).

Т а б л и ц а VII-31

Нормы качества доменного кокса из углей Донецкого бассейна\* (ГОСТ 513—63)

| Показатели                                                       | Марки кокса         |      |       |      |        |      |
|------------------------------------------------------------------|---------------------|------|-------|------|--------|------|
|                                                                  | КД-I                |      | КД-II |      | КД-III |      |
|                                                                  | Класс крупности, мм |      |       |      |        |      |
|                                                                  | < 40                | < 25 | < 40  | < 25 | < 40   | < 25 |
| Содержание влаги $W_p$ , %:                                      |                     |      |       |      |        |      |
| среднее . . . . .                                                | —                   | —    | 3,0   | —    | —      | —    |
| предельное . . . . .                                             | —                   | —    | 5,0   | —    | —      | —    |
| Зольность $A_c$ , %:                                             |                     |      |       |      |        |      |
| I группа:                                                        |                     |      |       |      |        |      |
| средняя . . . . .                                                | —                   | —    | 9,3   | —    | —      | —    |
| предельная . . . . .                                             | —                   | —    | 10,0  | —    | —      | —    |
| II группа:                                                       |                     |      |       |      |        |      |
| средняя . . . . .                                                | —                   | —    | 9,6   | —    | —      | —    |
| предельная . . . . .                                             | —                   | —    | 10,6  | —    | —      | —    |
| Содержание серы $S_{ог}^c$ , %:                                  |                     |      |       |      |        |      |
| среднее . . . . .                                                | 1,70                | —    | 1,80  | —    | 1,90   | 1,90 |
| предельное . . . . .                                             | 1,79                | —    | 1,89  | —    | 1,99   | 1,99 |
| Содержание фосфора $P^c$ , %                                     | ≤0,015              | —    | —     | —    | —      | —    |
| Выход летучих $V_r$ , %                                          | 1,2                 | —    | 1,2   | —    | 1,2    | 1,2  |
| Механическая прочность                                           |                     |      |       |      |        |      |
| M40, %:                                                          |                     |      |       |      |        |      |
| I группа:                                                        |                     |      |       |      |        |      |
| средняя . . . . .                                                | —                   | —    | 82    | —    | —      | —    |
| предельная . . . . .                                             | —                   | —    | 80    | —    | —      | —    |
| II группа:                                                       |                     |      |       |      |        |      |
| средняя . . . . .                                                | —                   | —    | 77    | —    | —      | —    |
| предельная . . . . .                                             | —                   | —    | 75    | —    | —      | —    |
| III группа:                                                      |                     |      |       |      |        |      |
| средняя . . . . .                                                | —                   | —    | 72    | —    | —      | —    |
| предельная . . . . .                                             | —                   | —    | 70    | —    | —      | —    |
| Механическая прочность                                           |                     |      |       |      |        |      |
| M10, %:                                                          |                     |      |       |      |        |      |
| I группа . . . . .                                               | —                   | —    | 8,0   | —    | —      | —    |
| II группа . . . . .                                              | —                   | —    | 9,0   | —    | —      | —    |
| III группа . . . . .                                             | —                   | —    | 10,0  | —    | —      | —    |
| Предельное содержание в коксе мелочи (куски размером < 25 мм), % | 3,0                 | 4,0  | 3,0   | 4,0  | 3,0    | 4,0  |
| Содержание кокса класса 25—40 мм в коксе, % предельное           | 9,0                 | 16,0 | 9,0   | 16,0 | 9,0    | 16,0 |

\* Нормы содержания фосфора, выхода летучих веществ, механической прочности M10 и содержания кокса класса 25—40 мм в коксе с размером кусков более 25 мм не являются браковочными и служат для характеристики качества кокса.

Таблица VII-32

Нормы качества доменного кокса из углей восточных районов (ГОСТ 2014—53\*)

| Показатели                                                                                       | Марки кокса         |       |       |       |        |       |       |       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
|                                                                                                  | КД-I                |       | КД-II |       | КД-III |       | КД-IV |       |
|                                                                                                  | Класс крупности, мм |       |       |       |        |       |       |       |
|                                                                                                  | <40                 | 25—40 | <40   | 25—40 | <40    | 25—40 | <40   | 25—40 |
| Содержание влаги $W_p$ , %:                                                                      |                     |       |       |       |        |       |       |       |
| среднее . . . . .                                                                                | 3,0                 | 8,0   | 3,0   | 8,0   | 3,0    | 8,0   | 3,0   | 8,0   |
| предельное . . . . .                                                                             | 5,0                 | 12,0  | 5,0   | 12,0  | 5,0    | 12,0  | 5,0   | 12,0  |
| Зольность $A^c$ , %:                                                                             |                     |       |       |       |        |       |       |       |
| средняя . . . . .                                                                                | 10,5                | 10,6  | 10,6  | 10,6  | 11,6   | 11,7  | 10,5  | 10,8  |
| предельная . . . . .                                                                             | 11,5                | 11,6  | 11,6  | 11,6  | 12,6   | 12,7  | 11,7  | 12,0  |
| Содержание серы $S_{oc}^c$ , % .                                                                 | 0,5                 | —     | 0,5   | —     | 0,7    | —     | 0,5   | —     |
| Выход летучих $V^c$ , % . . .                                                                    | 1,5                 | —     | 1,5   | —     | 1,5    | —     | 1,5   | —     |
| Механическая прочность $M_{40}$ , %:                                                             |                     |       |       |       |        |       |       |       |
| I группа:                                                                                        |                     |       |       |       |        |       |       |       |
| средняя . . . . .                                                                                | 77                  | —     | 77    | —     | 77     | —     | 77    | —     |
| предельная . . . . .                                                                             | 73                  | —     | 73    | —     | 73     | —     | 73    | —     |
| II группа:                                                                                       |                     |       |       |       |        |       |       |       |
| средняя . . . . .                                                                                | 71                  | —     | 71    | —     | 71     | —     | 71    | —     |
| предельная . . . . .                                                                             | 68                  | —     | 68    | —     | 68     | —     | 68    | —     |
| III группа:                                                                                      |                     |       |       |       |        |       |       |       |
| средняя . . . . .                                                                                | 66                  | —     | 66    | —     | 66     | —     | 66    | —     |
| предельная . . . . .                                                                             | 62                  | —     | 62    | —     | 62     | —     | 62    | —     |
| Механическая прочность $M_{10}$ , %:                                                             |                     |       |       |       |        |       |       |       |
| I группа . . . . .                                                                               | 9                   | —     | 9     | —     | 9      | —     | 9     | —     |
| II группа . . . . .                                                                              | 10                  | —     | 10    | —     | 10     | —     | 10    | —     |
| III группа . . . . .                                                                             | 12                  | —     | 12    | —     | 12     | —     | 12    | —     |
| Содержание мелочи в коксе (куски менее 25 мм), %:                                                |                     |       |       |       |        |       |       |       |
| среднее . . . . .                                                                                | 1,5                 | 6,0   | —     | —     | 1,5    | 6,0   | 3,0   | 6,0   |
| предельное . . . . .                                                                             | 3,0                 | 8,0   | —     | —     | 3,0    | 8,0   | 5,0   | 8,0   |
| Содержание кокса класса 25—40 мм в коксе класса крупности 40 мм и более, %, предельное . . . . . | 9                   | —     | 10    | —     | 10     | —     | 10    | —     |

Примечания: 1. ГОСТ 2014—53\* не распространяется на кокс из углей Кизеловского, Печорского, Карагадинского и Кузнецкого бассейнов, на которые распространяются ГОСТ 3132—63, 8836—58\*, 10166—62 и 9813—61.

2. Показатели содержания в коксе серы, выхода летучих веществ, механической прочности ( $M_{10}$ ) не являются браковочными и служат для характеристики качества кокса.

Таблица VII-33

Нормы качества кокса литейного каменноугольного (ГОСТ 3340—60)

| Показатель                      | Марки кокса |       |      |
|---------------------------------|-------------|-------|------|
|                                 | КЛ-1        | КЛ-2  | КЛ-3 |
| Класс крупности, мм:            |             |       |      |
| I группа                        | —           | >80   | —    |
| II группа                       | >60         | 60—80 | —    |
| III группа                      | >40         | 40—60 | —    |
| Предельное содержание влаги, %: | —           | 4,0   | —    |
| Зольность $A^c$ , %:            | 11,0        | 9,5   | 10,5 |
| средняя                         | 12,5        | 11,0  | 12,0 |
| предельная                      | —           | —     | —    |
| Содержание серы $S_{oc}^c$ , %: |             |       |      |
| среднее                         | 0,45        | 0,8   | 1,2  |
| предельное                      | 0,6         | 1,0   | 1,4  |

| Показатели                                              | Марки кокса |            |      |
|---------------------------------------------------------|-------------|------------|------|
|                                                         | КЛ-1        | КЛ-2       | КЛ-3 |
| Выход летучих $V_r$ , % . . . . .                       | —           | 1,2        | —    |
| Механическая прочность $M_{40}$ , %:                    |             |            |      |
| I группа:                                               |             |            |      |
| средняя . . . . .                                       | —           | 80         | —    |
| предельная . . . . .                                    | —           | 75         | —    |
| II группа:                                              |             |            |      |
| средняя . . . . .                                       | —           | 73         | —    |
| предельная . . . . .                                    | —           | 68         | —    |
| Механическая прочность $M_{10}$ , %:                    |             |            |      |
| I группа . . . . .                                      | —           | 10         | —    |
| II группа . . . . .                                     | —           | 12         | —    |
| Содержание мелочи (<40 мм) в крупном коксе, % . . . . . | —           | $\leq 4,0$ | —    |
| Пористость, % . . . . .                                 | —           | $\leq 42$  | —    |

Примечание. Показатели содержания  $W^p$ ,  $V^r$ , механической прочности  $M_{10}$  и пористости кокса не являются браковочными признаками и служат дополнительной характеристикой кокса.

Таблица VII-34

Средняя теплоемкость кокса, кДж/(кг·°C)

| Температурные интервалы коксования, °C | Зольность $A^c$ кокса, % |        |        |        |        |
|----------------------------------------|--------------------------|--------|--------|--------|--------|
|                                        | 7                        | 9      | 11     | 13     | 15     |
| 0—800                                  | 1,4110                   | 1,4026 | 1,3984 | 1,3900 | 1,3816 |
| 0—850                                  | 1,4361                   | 1,4277 | 1,4193 | 1,4110 | 1,4068 |
| 0—900                                  | 1,4570                   | 1,4486 | 1,4403 | 1,4319 | 1,4235 |
| 0—950                                  | 1,4779                   | 1,4696 | 1,4612 | 1,4528 | 1,4444 |
| 0—1000                                 | 1,4447                   | 1,4863 | 1,4738 | 1,4654 | 1,4570 |
| 0—1050                                 | 1,5114                   | 1,4989 | 1,4905 | 1,4821 | 1,4738 |
| 0—1100                                 | 1,5282                   | 1,5198 | 1,5114 | 1,5031 | 1,4947 |

## СЖИГАНИЕ ТОПЛИВА

## ТЕПЛОТА СГОРАНИЯ ТОПЛИВА

## А. По Кнорре

Древесное топливо

$$Q_v = 38728 C + 115974 H - 14486 O \text{ кДж/кг.}$$

Торф и мазут

$$Q_v = 37179 C + 111536 H - 13942 O \text{ кДж/кг.}$$

Бурий уголь

$$Q_v = 36425 C + 109275 H - 13649 O \text{ кДж/кг.}$$

Битуминозные каменные угли

$$Q_v = 35797 C + 107182 H - 13398 O \text{ кДж/кг.}$$

Антрациты

$$Q_v = 35169 C + 105089 H - 13188 O \text{ кДж/кг.}$$

## Б. По Менделееву

$$Q_v = 339 C + 1256 H + 109 (S - O) \text{ кДж/кг.}$$

Для всех формул

$$Q_n = Q_v - 25 (9H + W) \text{ кДж/кг,}$$

где  $W$  — влажность топлива, %.

Общая формула для определения теплоты сгорания газообразного топлива

$$Q_n^{об} = \frac{q_{CO} CO + q_{H_2} H_2 + q_{CH_4} CH_4 + \dots}{100}$$

где  $q_{CO}$ ,  $q_{H_2}$  — теплота реакции сгорания горючих газов, кДж/м<sup>3</sup> (см. табл. VII-1; VIII-3 и VIII-4); $CO$ ,  $H_2$  — содержание горючих газов, %.

Таблица VIII-1

Формулы для приближенных расчетов по сжиганию топлива

| Вид топлива                          | Теоретически необходимое количество сухого воздуха, м <sup>3</sup> /кг | Вид топлива                                                        | Разность между объемом продуктов сгорания и количеством израсходованного воздуха, м <sup>3</sup> /кг |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Растительные суррогаты, дрова и торф | $L_{теор} = \frac{0,255}{1000} Q_p^p + 0,007 W^p - 0,06$               | Растительные суррогаты, дрова, торф и каменные угли с $A^p < 16\%$ | $\Delta V = 1,15 - \frac{0,028}{1000} Q_p^p$                                                         |
|                                      |                                                                        | Бурые угли с $A^p < 16\%$                                          | $\Delta V = 1,02 - \frac{0,026}{1000} Q_p^p$                                                         |

| Вид топлива                                                               | Теоретически необходимое количество сухого воздуха, м <sup>3</sup> /кг                                                                                                                                                                                               | Вид топлива                                                  | Разность между объемом продуктов сгорания и количеством ирасходованного воздуха, м <sup>3</sup> /кг                                                                                                                                                  |
|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                      | Бурые и каменные угли с $A^p = 16 - 30\%$                    | $\Delta V = 0,97 - \frac{0,026}{1000} Q_n^p$                                                                                                                                                                                                         |
| Бурые и каменные угли, антрацит и жидкое топливо с $Q_n^p < 29308$ кДж/кг | $L_{\text{теор}} = \frac{0,263}{1000} Q_n^p + 0,007 W^p - \Delta L$ ,<br>где для антрацита и кокса $\Delta L = 0$ , а для прочих топлив $\Delta L = +0,06$                                                                                                           | Угли с $A^p > 30\%$ , антрацит и кокс                        | $\Delta V = 0,4 - \frac{0,086}{1000} \times Q_n^p + 0,0124 (W^p - W_{\text{гр}})$<br>для бурых углей $W_{\text{гр}} = 8\%$ ;<br>для каменных углей $W_{\text{гр}} = 0\%$ ;<br>для кокса $W_{\text{гр}} = 12\%$ ;<br>для прочих $W_{\text{гр}} = W^p$ |
|                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                      | Жидкое топливо с $Q_n^p > 29308$ кДж/кг                      | $\Delta V = \frac{0,028}{1000} Q_n^p - 0,48 + 0,0124 (W^p - W_{\text{гр}})$ ;<br>для мазута $W_{\text{гр}} = 2\%$ ;<br>для прочих $W_{\text{гр}} = W^p$                                                                                              |
| Доменный газ                                                              | $L_{\text{теор}} = \frac{0,191}{1000} Q_n$                                                                                                                                                                                                                           | Доменный газ                                                 | $\Delta V = 0,97 - \frac{0,031}{1000} Q_n$                                                                                                                                                                                                           |
| Генераторный паровоздушный и водяной) и доменный древесноугольный газы    | $L_{\text{теор}} = \frac{0,203}{1000} Q_n + \Delta L$ ;<br>для газа с $Q_n > 5652$ кДж/м <sup>3</sup> $\Delta L = +0,03$ ;<br>для газа с $Q_n = 5234 \div 5652$ кДж/м <sup>3</sup> $\Delta L = 0$ ;<br>для газа с $Q_n < 5234$ кДж/м <sup>3</sup> $\Delta L = -0,01$ | Генераторный, паровоздушный и доменный древесноугольный газы | $\Delta V = 0,98 - \frac{0,031}{1000} Q_n$                                                                                                                                                                                                           |
|                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                      | Генераторный водяной газ                                     | $\Delta V = 1,01 - \frac{0,043}{1000} Q_n$                                                                                                                                                                                                           |
| Коксовый газ                                                              | $L_{\text{теор}} = \frac{0,257}{1000} Q_n - 0,25$                                                                                                                                                                                                                    | Коксовый газ                                                 | $\Delta V = 0,68 + a \times \frac{Q_n - 16747}{1000}$<br>при $Q_n > 16747$ кДж/м <sup>3</sup> $a = +0,014$ ;<br>при $Q_n < 16747$ кДж/м <sup>3</sup> $a = -0,024$                                                                                    |
| Природный газ                                                             | $L_{\text{теор}} = \frac{0,264}{1000} Q_n + \Delta L$ ;<br>при $Q_n < 41868$ кДж/м <sup>3</sup> $\Delta L = 0,02$ ;<br>при $Q_n > 41868$ кДж/м <sup>3</sup> $\Delta L = 0$                                                                                           | Природный газ                                                | при $Q_n < 34541$ кДж/м <sup>3</sup> $\Delta V = 1,0$ ;<br>при $Q_n > 34541$ кДж/м <sup>3</sup> $\Delta V = 0,38 + \frac{0,179}{1000} Q_n$                                                                                                           |

# ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ СЖИГАНИИ ТОПЛИВ

Таблица VIII-2

Температура воспламенения и пределы горючести газов

| Газ и его химическая формула                       | Температура воспламенения в смеси с воздухом, °C | Максимальная скорость распространения пламени, см/с | Содержание газа в смеси, %                        |                  |        |        | Соотношение воздуха/газ                           |                  |        |        | Коэффициент расхода воздуха                       |                  |        | Теоретическое количество воздуха, м³/м³ |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------|--------|--------|---------------------------------------------------|------------------|--------|--------|---------------------------------------------------|------------------|--------|-----------------------------------------|
|                                                    |                                                  |                                                     | при максимальной скорости распространения пламени | предел горючести |        | нижний | при максимальной скорости распространения пламени | предел горючести |        | нижний | при максимальной скорости распространения пламени | предел горючести |        |                                         |
|                                                    |                                                  |                                                     |                                                   | верхний          | нижний |        |                                                   | верхний          | нижний |        |                                                   | верхний          | нижний |                                         |
|                                                    |                                                  |                                                     |                                                   |                  |        |        |                                                   |                  |        |        |                                                   |                  |        |                                         |
| Метан (CH <sub>4</sub> )                           | 537                                              | 67,0                                                | 10,50                                             | 15,0             | 5,0    | 8,5    | 5,65                                              | 19,0             | 0,90   | 0,59   | 2,00                                              | 9,52             |        |                                         |
| Этан (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )              | 510                                              | 85,0                                                | 6,53                                              | 12,5             | 3,2    | 14,3   | 7,00                                              | 30,3             | 0,86   | 0,42   | 1,82                                              | 16,67            |        |                                         |
| Этилен (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )            | 540                                              | 142,0                                               | 7,10                                              | 18,6             | 2,75   | 13,3   | 2,50                                              | 35,4             | 0,93   | 0,75   | 2,48                                              | 14,29            |        |                                         |
| Пропан (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )            | 466                                              | 82,0                                                | 4,71                                              | 9,5              | 2,37   | 20,2   | 9,50                                              | 40,6             | 0,85   | 0,40   | 1,70                                              | 23,81            |        |                                         |
| Нормальный бутан (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> ) | 430                                              | 82,5                                                | 3,66                                              | 8,4              | 1,86   | 26,3   | 10,90                                             | 51,5             | 0,85   | 0,35   | 1,66                                              | 30,95            |        |                                         |
| Пропилен (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> )          | 455                                              | 101,0                                               | 4,80                                              | 11,1             | 2,0    | 19,8   | 8,00                                              | 49,0             | 0,92   | 0,37   | 2,28                                              | 21,43            |        |                                         |
| Оксись углерода (CO)                               | 610                                              | 33,0                                                | 53,0                                              | 74,2             | 12,5   | 0,89   | 0,34                                              | 7,1              | 0,37   | 0,14   | 3,0                                               | 2,38             |        |                                         |
| Водород (H <sub>2</sub> )                          | 510                                              | 483,0                                               | 42,0                                              | 74,2             | 4,0    | 1,38   | 0,34                                              | 24,0             | 0,58   | 0,14   | 10,0                                              | 2,38             |        |                                         |
| Ацетилен (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )          | 335                                              | 131,0                                               | 10,0                                              | 80,0             | 2,5    | 9,0    | 0,24                                              | 39,0             | 0,76   | 0,20   | 3,28                                              | 11,90            |        |                                         |
| Бензол (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )            | 570                                              | 38,5                                                | 3,0                                               | 6,75             | 1,41   | 32,2   | 13,8                                              | 70,0             | 0,90   | 0,39   | 1,96                                              | 35,70            |        |                                         |
| Аммиак (NH <sub>3</sub> )                          | 780                                              | —                                                   | —                                                 | 26,40            | 16,10  | —      | 2,78                                              | 5,25             | —      | 0,78   | 1,47                                              | 3,57             |        |                                         |
| Генераторный газ                                   | 530                                              | —                                                   | —                                                 | 74,0             | 20,7   | —      | 0,35                                              | 3,82             | —      | 0,29   | 3,2                                               | 1,19             |        |                                         |
| Коксовый газ                                       | 500                                              | 170,0                                               | —                                                 | 30,4             | 5,6    | —      | 2,32                                              | 16,9             | —      | 0,57   | 4,15                                              | 4,06             |        |                                         |
| Природный газ                                      | 530                                              | —                                                   | —                                                 | 14,8             | 3,0    | —      | 5,65                                              | 32,0             | —      | 0,63   | 1,90                                              | 9,25             |        |                                         |
| Водяной газ                                        | —                                                | 280,0                                               | —                                                 | 72,0             | 6,2    | —      | —                                                 | —                | —      | —      | —                                                 | —                |        |                                         |
| Доменный газ                                       | 530                                              | —                                                   | —                                                 | 74,0             | 35,0   | —      | —                                                 | —                | —      | —      | —                                                 | —                |        |                                         |

Примечания: 1. С повышением температуры пределы воспламенения газовых смесей, состоящих из однородных горючих компонентов с малым содержанием балласта (например, природных газов), определяются из соотношения  $L = \frac{p_1}{100} + \frac{p_2}{p_1} + \frac{p_3}{p_1}$ , где  $L$  — предел воспламе-

нения (нижний или верхний) газовой смеси, состоящей из компонентов 1, 2, 3, ....; содержание компонентов в газовой смеси  $p_1, p_2, p_3$ ; пределы воспламенения (нижний или верхний) компонентов  $L_1, L_2, L_3, \dots$ . Пределы воспламенения сужаются, если в газовой смеси содержатся CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O.  
2. Данные определены при сжигании в трубке с  $d_0=25$  мм. При изменении диаметра трубки скорость воспламенения также изменяется, при  $d_0=100$  мм она увеличивается в 1,6 раза; при  $d_0=200$  мм — в 2,2 раза; при  $d_0=300$  мм — в 2,6 раза.

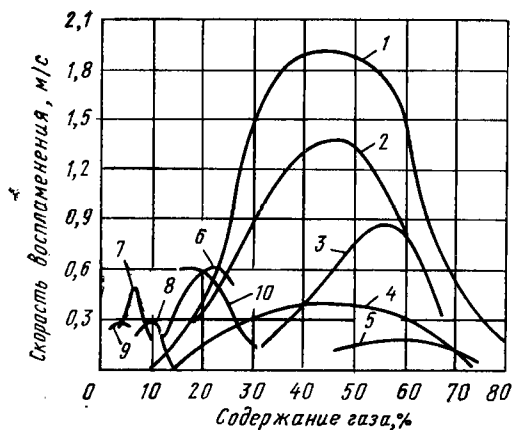


Рис. 57. Зависимость скорости воспламенения газо-воздушных смесей от содержания газа: 1 — водород; 2 — водяной газ; 3 — смесь генераторного и водяного газов; 4 — окись углерода; 5 — генераторный газ; 6 — светильный газ; 7 — этилен; 8 — метан; 9 — бутан; 10 — коксовый газ ( $Q_R = 19750 \text{ кДж/м}^3$ )

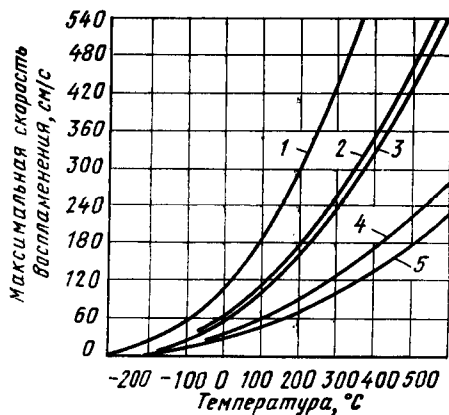


Рис. 58. Зависимость скорости воспламенения газо-воздушных смесей в зависимости от температуры  $t_{\text{п}}$  подогрева: 1 — водяной газ; 2 — коксовый газ; 3 — карбюрированный водяной газ; 4 — природный газ; 5 — генераторный газ

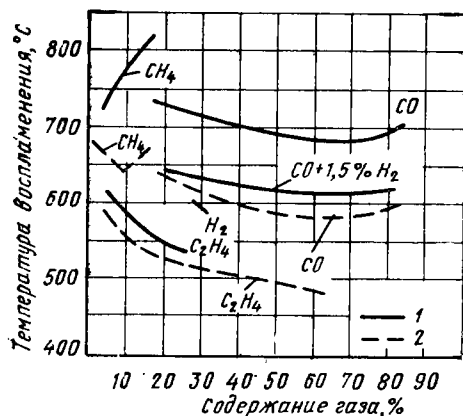


Рис. 59. Зависимость температуры воспламенения от содержания газов: 1 — в смеси с воздухом; 2 — в смеси с кислородом

## Таблица VIII-3

### Тепловые эффекты реакций горения

| Уравнения реакций                                                                    | Тепловой эффект реакций          |                        |          |        |        |          |        |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------|----------|--------|--------|----------|--------|
|                                                                                      | Н <sub>2</sub> О (жид-<br>кость) | Н <sub>2</sub> О (пар) |          |        |        |          |        |
|                                                                                      |                                  | кДж/моль               | кДж/моль | кДж/м³ | кДж/кг | кДж/моль | кДж/кг |
|                                                                                      |                                  |                        |          |        |        |          |        |
| Н <sub>2</sub> + 0,5 О <sub>2</sub> = Н <sub>2</sub> О. . . . .                      | 285791                           | 241746                 | 10785    | 119910 | 484078 | 15127    |        |
| 2 Н <sub>2</sub> + С = СН <sub>4</sub> . . . . .                                     | —                                | 79666                  | —        | —      | —      | —        |        |
| 2 Н <sub>2</sub> + 2С = С <sub>2</sub> Н <sub>4</sub> . . . . .                      | —                                | 59218                  | —        | —      | —      | —        |        |
| С (графит) + О <sub>2</sub> = СО <sub>2</sub> . . . . .                              | —                                | 394480                 | —        | —      | —      | —        |        |
| С (аморфный) + О <sub>2</sub> = СО <sub>2</sub> . . . . .                            | —                                | 408841                 | —        | 34068  | 408841 | 12774    |        |
| С (графит) + 0,5 О <sub>2</sub> = СО. . . . .                                        | —                                | 110389                 | —        | —      | —      | —        |        |
| С (аморфный) + 0,5 О <sub>2</sub> = СО. . . . .                                      | —                                | 125478                 | —        | 10270  | 246435 | 7700     |        |
| С + СО <sub>2</sub> = 2 СО. . . . .                                                  | —                                | 162406                 | —        | —13548 | —      | —        |        |
| С + Н <sub>2</sub> О <sub>пар</sub> = СО + Н <sub>2</sub> . . . . .                  | —                                | 118821                 | —        | —9902  | —      | —        |        |
| СО + 0,5 О <sub>2</sub> = СО <sub>2</sub> . . . . .                                  | —                                | 282986                 | 12627    | 10102  | 571247 | 17853    |        |
| СО + Н <sub>2</sub> О <sub>пар</sub> = СО <sub>2</sub> + Н <sub>2</sub> . . . . .    | —                                | 43585                  | —        | —      | —      | —        |        |
| S + O <sub>2</sub> = SO <sub>2</sub> . . . . .                                       | —                                | 296927                 | —        | 9131   | 584477 | 18263    |        |
| H <sub>2</sub> S + 1,5 O <sub>2</sub> = SO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O . . . . . | 563166                           | 518996                 | 23170    | 15265  | 349573 | 10794    |        |

## Тепловые эффекты реакций горения углеводородов

| Наименование                | Уравнения реакций                                                                  | H <sub>2</sub> O (пар) |          |        | H <sub>2</sub> O (жидкость) |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|----------|--------|-----------------------------|
|                             |                                                                                    | кДж/м <sup>3</sup>     | кДж/моль | кДж/кг |                             |
| Метан . . . . .             | $\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$                  | 35818                  | 803112   | 50062  | 891202                      |
| Этан . . . . .              | $\text{C}_2\text{H}_6 + 3,5 \text{O}_2 = 2 \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$     | 63748                  | 1429290  | 47533  | 1561425                     |
| н-Пропан . . . . .          | $\text{C}_3\text{H}_8 + 5 \text{O}_2 = 3 \text{CO}_2 + 4 \text{H}_2\text{O}$       | 91255                  | 2046047  | 46402  | 2222186                     |
| н-Бутан . . . . .           | $\text{C}_4\text{H}_{10} + 6,5 \text{O}_2 = 4 \text{CO}_2 + 5 \text{H}_2\text{O}$  | 118646                 | 2660083  | 45770  | 2880309                     |
| н-Пентан . . . . .          | $\text{C}_5\text{H}_{12} + 8 \text{O}_2 = 5 \text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$    | 146077                 | —        | —      | —                           |
| Бензол . . . . .            | $\text{C}_6\text{H}_6 + 7,5 \text{O}_2 = 6 \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$     | 140375                 | 3147008  | 40294  | 3279144                     |
| Метилбензол . . . . .       | $\text{C}_7\text{H}_8 + 9 \text{O}_2 = 7 \text{CO}_2 + 4 \text{H}_2\text{O}$       | 168393                 | —        | —      | —                           |
| Этилбензол . . . . .        | $\text{C}_8\text{H}_{10} + 10,5 \text{O}_2 = 8 \text{CO}_2 + 5 \text{H}_2\text{O}$ | 195850                 | —        | —      | —                           |
| Пропилбензол . . . . .      | $\text{C}_9\text{H}_{12} + 12 \text{O}_2 = 9 \text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$   | 223232                 | —        | —      | —                           |
| Этилен . . . . .            | $\text{C}_2\text{H}_4 + 3 \text{O}_2 = 2 \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$       | 59063                  | 1324096  | 47202  | 1412166                     |
| Пропилен . . . . .          | $\text{C}_3\text{H}_6 + 4,5 \text{O}_2 = 3 \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$     | 86001                  | —        | —      | —                           |
| Бутилен . . . . .           | $\text{C}_4\text{H}_8 + 6 \text{O}_2 = 4 \text{CO}_2 + 4 \text{H}_2\text{O}$       | 113508                 | 2544695  | 45356  | 2720876                     |
| Пентилен . . . . .          | $\text{C}_5\text{H}_{10} + 7,5 \text{O}_2 = 5 \text{CO}_2 + 5 \text{H}_2\text{O}$  | 140885                 | —        | —      | —                           |
| Ацетилен . . . . .          | $\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5 \text{O}_2 = 2 \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$       | 56053                  | 1256207  | 48249  | 1300253                     |
| Метилацетилен . . . . .     | $\text{C}_3\text{H}_4 + 4 \text{O}_2 = 3 \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$       | 100140                 | —        | —      | —                           |
| Этилацетилен . . . . .      | $\text{C}_4\text{H}_6 + 5,5 \text{O}_2 = 4 \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$     | 110075                 | —        | —      | —                           |
| Пентин . . . . .            | $\text{C}_5\text{H}_8 + 7 \text{O}_2 = 5 \text{CO}_2 + 4 \text{H}_2\text{O}$       | 137390                 | —        | —      | —                           |
| Циклопентан . . . . .       | $\text{C}_5\text{H}_{10} + 7,5 \text{O}_2 = 5 \text{CO}_2 + 5 \text{H}_2\text{O}$  | 138374                 | —        | —      | —                           |
| Метициклопентан . . . . .   | $\text{C}_6\text{H}_{12} + 9 \text{O}_2 = 6 \text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$    | 165420                 | —        | —      | —                           |
| Этилциклопентан . . . . .   | $\text{C}_7\text{H}_{14} + 10,5 \text{O}_2 = 7 \text{CO}_2 + 7 \text{H}_2\text{O}$ | 192873                 | —        | —      | —                           |
| Пропилциклопентан . . . . . | $\text{C}_8\text{H}_{16} + 12 \text{O}_2 = 8 \text{CO}_2 + 8 \text{H}_2\text{O}$   | 220301                 | —        | —      | —                           |
| Циклогексан . . . . .       | $\text{C}_6\text{H}_{12} + 9 \text{O}_2 = 6 \text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$    | 164688                 | —        | —      | —                           |
| Метилциклогексан . . . . .  | $\text{C}_7\text{H}_{14} + 10,5 \text{O}_2 = 7 \text{CO}_2 + 7 \text{H}_2\text{O}$ | 191638                 | —        | —      | —                           |
| Этилциклогексан . . . . .   | $\text{C}_8\text{H}_{16} + 12 \text{O}_2 = 8 \text{CO}_2 + 8 \text{H}_2\text{O}$   | 219242                 | —        | —      | —                           |
| Пропилциклогексан . . . . . | $\text{C}_9\text{H}_{18} + 13,5 \text{O}_2 = 9 \text{CO}_2 + 9 \text{H}_2\text{O}$ | 246644                 | —        | —      | —                           |

Таблица VIII-5

Жаропродуцируемость, °С, некоторых топлив (для ориентировочных подсчетов)

| Топливо                                                          | Избыток воздуха, %, при температуре, °С |      |      |
|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|------|------|
|                                                                  | 0                                       | 50   | 100  |
| Оксид углерода . . . . .                                         | 2400                                    | 1850 | 1500 |
| Углерод . . . . .                                                | 2240                                    | 1640 | 1300 |
| Водород . . . . .                                                | 2200                                    | 1680 | 1300 |
| Природный газ ( $Q_H^P = 35567$ кДж/м³) . . . . .                | 2050                                    | 1550 | 1170 |
| Нефть ( $Q_H^P = 42031$ кДж/м³) . . . . .                        | 2150                                    | 1590 | 1220 |
| Древесина безводная ( $Q_H^P = 17585$ кДж/м³) . . . . .          | 2050                                    | 1520 | 1170 |
| Древесина при влажности:                                         |                                         |      |      |
| 20% ( $Q_H^P = 14235$ кДж/м³) . . . . .                          | 1850                                    | 1420 | 1110 |
| 40% ( $Q_H^P = 10048$ кДж/м³) . . . . .                          | 1670                                    | 1290 | 1080 |
| 50% ( $Q_H^P = 7954$ кДж/м³) . . . . .                           | 1510                                    | 1200 | 1000 |
| Торфяная масса безводная ( $Q_H^P = 22337$ кДж/м³) . . . . .     | 2050                                    | 1530 | 1190 |
| Торф при влажности:                                              |                                         |      |      |
| 20% ( $Q_H^P = 17333$ кДж/м³) . . . . .                          | 1920                                    | 1440 | 1160 |
| 40% ( $Q_H^P = 12393$ кДж/м³) . . . . .                          | 1710                                    | 1320 | 1090 |
| 50% ( $Q_H^P = 9910$ кДж/м³) . . . . .                           | 1570                                    | 1210 | 1010 |
| Буроугольная масса безводная ( $Q_H^P = 27604$ кДж/м³) . . . . . | 2060                                    | 1540 | 1210 |
| Бурый уголь при влажности:                                       |                                         |      |      |
| 20% ( $Q_H^P = 21604$ кДж/м³) . . . . .                          | 2030                                    | 1500 | 1190 |
| 40% ( $Q_H^P = 15575$ кДж/м³) . . . . .                          | 1800                                    | 1400 | 1120 |
| Каменный уголь:                                                  |                                         |      |      |
| безводный ( $Q_H^P = 32196$ кДж/м³) . . . . .                    | 2180                                    | 1555 | 1220 |
| при влажности 5% ( $Q_H^P = 30857$ кДж/м³) . . . . .             | 2170                                    | 1545 | 1210 |
| Антрацит:                                                        |                                         |      |      |
| безводный, на горючую массу ( $Q_H^P = 35253$ кДж/м³) . . . . .  | 2270                                    | 1565 | 1220 |
| при влажности 5% ( $Q_H^P = 33076$ кДж/м³) . . . . .             | 2260                                    | 1555 | 1210 |

| Топливо                                                                 | Избыток воздуха, %, при температуре, °С |      |      |      |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|------|------|------|
|                                                                         | 0                                       | 20   | 40   | 100  |
| Доменный газ при $Q_H^{д.г.}$ , кДж/м³:                                 |                                         |      |      |      |
| 3869 . . . . .                                                          | 1450                                    | 1340 | 1260 | 1050 |
| 3977 . . . . .                                                          | —                                       | —    | —    | —    |
| 4032 . . . . .                                                          | 1500                                    | 1400 | 1300 | 1070 |
| 4187 . . . . .                                                          | 1530                                    | 1430 | 1330 | 1100 |
| Генераторный газ ( $Q_H^{г.г.} = 5422$ кДж/м³) . . . . .                | 1780                                    | 1610 | 1400 | 1190 |
| Воздушно-генераторный газ. ( $Q_H^{в.г.} = 4430$ кДж/м³) . . . . .      | 1600                                    | 1500 | 1380 | 1150 |
| Генераторный газ из бурого угля ( $Q_H^{г.б.} = 6163$ кДж/м³) . . . . . | 1800                                    | 1620 | 1500 | 1200 |
| Колошниковый газ торфяной домны:                                        |                                         |      |      |      |
| на обыкновенном дутье ( $Q_H^к = 6435$ кДж/м³) . . . . .                | 1830                                    | 1640 | 1520 | 1210 |
| на кислородном дутье ( $Q_H^{к.к.} = 11062$ кДж/м³) . . . . .           | 2110                                    | 1860 | 1630 | 1300 |
| Коксовый газ ( $Q_H^{к.г.} = 16027$ кДж/м³) . . . . .                   | 2100                                    | 1800 | 1550 | 1230 |
| Водяной газ ( $Q_H^{в.г.} = 10819$ кДж/м³) . . . . .                    | 2220                                    | 2000 | 1800 | 1360 |

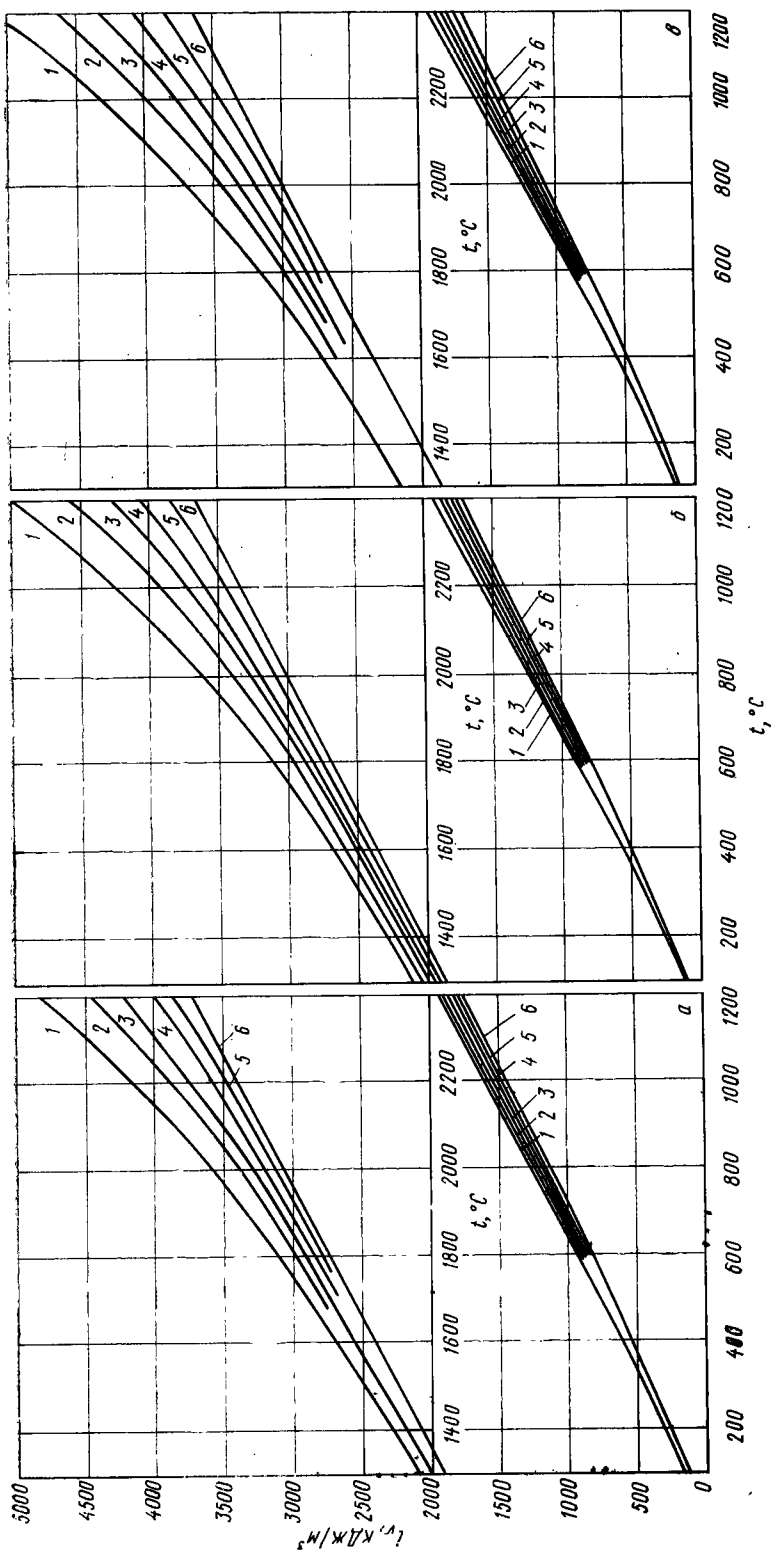


Рис. 60. Диаграмма  $i-t$ :  
 а — для газов: природного, коксового и доменного при  $Q_R > 12$  МДж/м<sup>3</sup>; б — для газов: паровоздушного генераторного, смеси доменного и коксового при  $Q_R = 8 \div 12$  МДж/м<sup>3</sup>, мазута, каменного угля, антрацита, кокса; в — для газов: водяного, генераторного, смеси доменного и коксового при  $Q_R < 8$  МДж/м<sup>3</sup>, бурых углей, горючих сланцев, торфа и дров; 1 —  $V_L = 0\%$  (продукты сгорания без воздуха); 2 —  $V_L = 20\%$ ; 3 —  $V_L = 40\%$ ; 4 —  $V_L = 60\%$ ; 5 —  $V_L = 80\%$ ; 6 — чистый воздух

# КОЛИЧЕСТВО ВОЗДУХА И ДЫМА

Таблица VIII-6

Теоретический расход воздуха  $L_{1000}$  и объем дыма  $V_{1000}$

на 1000 кДж [ $L_{4,2}$  и  $V_{4,2}$  на 4,2 МДж (1000 ккал)] при сжигании различных топлив

| Название топлива                                                                                                                                                                                                                               | $L_{1000}, \text{ м}^3/1000 \text{ кДж}$<br>( $\text{м}^3/4,2 \text{ МДж}$ ) | $V_{1000}, \text{ м}^3/1000 \text{ кДж}$<br>( $\text{м}^3/4,2 \text{ МДж}$ ) |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Кокс, влажность < 5%                                                                                                                                                                                                                           | 0,263 (1,10)                                                                 | 0,265 (1,11)                                                                 |
| Антрацит                                                                                                                                                                                                                                       | 0,263 (1,10)                                                                 | 0,270 (1,13)                                                                 |
| Каменный уголь                                                                                                                                                                                                                                 | 0,260 (1,09)                                                                 | 0,270 (1,13)                                                                 |
| Бурий уголь, влажность, %:                                                                                                                                                                                                                     |                                                                              |                                                                              |
| 20                                                                                                                                                                                                                                             | 0,265 (1,11)                                                                 | 0,296 (1,24)                                                                 |
| 40                                                                                                                                                                                                                                             | 0,274 (1,15)                                                                 | 0,327 (1,37)                                                                 |
| Торф, влажность, %:                                                                                                                                                                                                                            |                                                                              |                                                                              |
| 20                                                                                                                                                                                                                                             | 0,265 (1,11)                                                                 | 0,305 (1,28)                                                                 |
| 30                                                                                                                                                                                                                                             | 0,270 (1,13)                                                                 | 0,327 (1,37)                                                                 |
| 40                                                                                                                                                                                                                                             | 0,274 (1,15)                                                                 | 0,348 (1,46)                                                                 |
| 50                                                                                                                                                                                                                                             | 0,289 (1,21)                                                                 | 0,382 (1,60)                                                                 |
| Дрова, влажность, %:                                                                                                                                                                                                                           |                                                                              |                                                                              |
| 20                                                                                                                                                                                                                                             | 0,263 (1,10)                                                                 | 0,317 (1,33)                                                                 |
| 30                                                                                                                                                                                                                                             | 0,272 (1,14)                                                                 | 0,344 (1,44)                                                                 |
| 40                                                                                                                                                                                                                                             | 0,277 (1,16)                                                                 | 0,368 (1,54)                                                                 |
| 50                                                                                                                                                                                                                                             | 0,294 (1,23)                                                                 | 0,413 (1,73)                                                                 |
| Мазут сухой                                                                                                                                                                                                                                    | 0,260 (1,09)                                                                 | 0,279 (1,17)                                                                 |
| Мазут влажностью 3%                                                                                                                                                                                                                            | 0,265 (1,11)                                                                 | 0,286 (1,20)                                                                 |
| Природный газ                                                                                                                                                                                                                                  | 0,265 (1,11)                                                                 | 0,296 (1,24)                                                                 |
| Коксовый газ ( $Q_{\text{H}}^{\text{K.Г}} = 15910 \text{ кДж/м}^3$ )                                                                                                                                                                           | 0,244 (1,02)                                                                 | 0,289 (1,21)                                                                 |
| Водяной газ ( $Q_{\text{H}}^{\text{B.Г}} = 10802 \text{ кДж/м}^3$ )                                                                                                                                                                            | 0,208 (0,87)                                                                 | 0,263 (1,10)                                                                 |
| Двойной водяной газ                                                                                                                                                                                                                            | 0,217 (0,91)                                                                 | 0,284 (1,19)                                                                 |
| Генераторный газ очищенный:                                                                                                                                                                                                                    |                                                                              |                                                                              |
| воздушно-генераторный ( $Q_{\text{H}}^{\text{B.Г}} = 4430 \text{ кДж/м}^3$ )                                                                                                                                                                   | 0,191 (0,80)                                                                 | 0,382 (1,60)                                                                 |
| генераторный ( $Q_{\text{H}}^{\text{Г}} = 5422 \text{ кДж/м}^3$ )                                                                                                                                                                              | 0,200 (0,84)                                                                 | 0,346 (1,45)                                                                 |
| генераторный буроугольный ( $Q_{\text{H}}^{\text{Г.Б}} = 6163 \text{ кДж/м}^3$ )                                                                                                                                                               | 0,210 (0,88)                                                                 | 0,339 (1,42)                                                                 |
| Генераторный газ неочищенный                                                                                                                                                                                                                   | 0,210 (0,88)                                                                 | 0,339 (1,42)                                                                 |
| То же, генератор непосредственно примыкает к печи:                                                                                                                                                                                             |                                                                              |                                                                              |
| из каменного угля ( $Q_{\text{H}}^{\text{Г}} = 5234 \text{ кДж/м}^3$ )                                                                                                                                                                         | 0,203 (0,85)                                                                 | 0,353 (1,40)                                                                 |
| из бурого угля, торфа или древесины ( $Q_{\text{H}} = 6280 \text{ кДж/м}^3$ )                                                                                                                                                                  | 0,212 (0,89)                                                                 | 0,382—0,394<br>(1,60—1,65)                                                   |
| Доменный газ очищенный при 30°C $Q_{\text{H}}^{\text{Д.Г}}, \text{ кДж/м}^3$ :                                                                                                                                                                 |                                                                              |                                                                              |
| 3349                                                                                                                                                                                                                                           | 0,191 (0,80)                                                                 | 0,458 (1,92)                                                                 |
| 3768                                                                                                                                                                                                                                           | 0,193 (0,81)                                                                 | 0,418 (1,75)                                                                 |
| 4187                                                                                                                                                                                                                                           | 0,196 (0,82)                                                                 | 0,411 (1,72)                                                                 |
| 4605                                                                                                                                                                                                                                           | 0,198 (0,83)                                                                 | 0,406 (1,70)                                                                 |
| Смесь доменного и коксового газов при теплоте сгорания доменного газа ( $Q_{\text{H}}^{\text{Д.Г}} = 3977 \text{ кДж/м}^3$ ), коксового газа ( $Q_{\text{H}}^{\text{K.Г}} = 15910 \text{ кДж/м}^3$ ) и при следующих соотношениях компонентов: |                                                                              |                                                                              |
| доменного газа 75%, коксового газа 25%; $Q_{\text{H}}^{\text{см}} = 6954 \text{ кДж/м}^3$                                                                                                                                                      | 0,222 (0,93)                                                                 | 0,341 (1,43)                                                                 |
| доменного газа 70%, коксового газа 30%; $Q_{\text{H}}^{\text{см}} = 7557 \text{ кДж/м}^3$                                                                                                                                                      | 0,227 (0,95)                                                                 | 0,334 (1,40)                                                                 |
| доменного газа 60%, коксового газа 40%; $Q_{\text{H}}^{\text{см}} = 8750 \text{ кДж/м}^3$                                                                                                                                                      | 0,232 (0,97)                                                                 | 0,322 (1,35)                                                                 |
| доменного газа 50%, коксового газа 50%; $Q_{\text{H}}^{\text{см}} = 9944 \text{ кДж/м}^3$                                                                                                                                                      | 0,234 (0,98)                                                                 | 0,313 (1,31)                                                                 |
| доменного газа 40%, коксового газа 60%; $Q_{\text{H}}^{\text{см}} = 11137 \text{ кДж/м}^3$                                                                                                                                                     | 0,236 (0,99)                                                                 | 0,305 (1,28)                                                                 |

Рис. 61. Зависимость изменения плотности  $\rho$  газа от его температуры  $t$  и состава (заштрихована наиболее употребительная область)

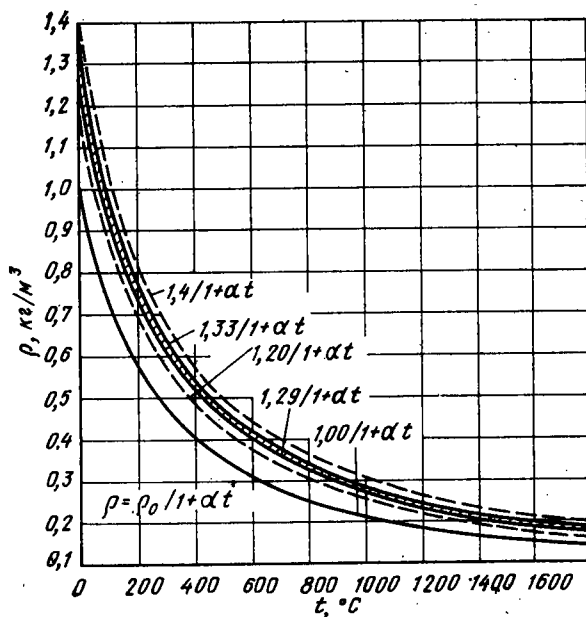


Таблица VIII-7

Количество воздуха и объем дыма для топлив с различной теплотой сгорания

| Виды топлива                             | Теплота сгорания, кДж/кг (кДж/м³) | Теоретическое количество воздуха, м³/кг (м³/м³) | Объем продуктов сгорания, м³/кг (м³/м³) |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Твердое топливо (1 кг, влажное)          | 12560                             | 3,54                                            | 4,26                                    |
|                                          | 16747                             | 4,54                                            | 5,18                                    |
|                                          | 20934                             | 5,55                                            | 6,10                                    |
|                                          | 25121                             | 6,56                                            | 7,02                                    |
|                                          | 29308                             | 7,58                                            | 7,94                                    |
|                                          | 33494                             | 8,59                                            | 8,86                                    |
| Нефть (1 кг)                             | 40193                             | 10,20                                           | 10,90                                   |
| Генераторный газ (1 м³, сухой)           | 4605                              | 0,97                                            | 1,84                                    |
|                                          | 5024                              | 1,05                                            | 1,90                                    |
|                                          | 5443                              | 1,13                                            | 1,97                                    |
|                                          | 5862                              | 1,21                                            | 2,03                                    |
|                                          | 6280                              | 1,29                                            | 2,10                                    |
| Коксовый газ (1 м³)                      | 15910                             | 3,87                                            | 4,60                                    |
|                                          | 16747                             | 4,04                                            | 4,81                                    |
|                                          | 17585                             | 4,31                                            | 5,02                                    |
|                                          | 18422                             | 4,53                                            | 5,24                                    |
| Доменный газ (1 м³)                      | 3768                              | 0,714                                           | 1,56                                    |
|                                          | 4187                              | 0,792                                           | 1,62                                    |
|                                          | 4605                              | 0,871                                           | 1,69                                    |
| Смесь коксового и доменного газов (1 м³) | 5862                              | 1,23                                            | 2,05                                    |
|                                          | 7536                              | 1,67                                            | 2,47                                    |
|                                          | 9211                              | 2,11                                            | 2,00                                    |
|                                          | 10886                             | 2,55                                            | 3,32                                    |
| Водяной газ                              | 11242                             | 2,35                                            | 2,90                                    |

# СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Таблица VIII-8

Состав и некоторые теплотехнические характеристики газообразного топлива

| Газы                                                                 | Состав газа, % (объемн) |                |                |                |      |                |                 |                | Теплота сгорания газа, кДж/м³                                     |                | Теоретический расход воздуха, L <sub>теор.</sub> , м³/м³ газа | Объем продуктов сгорания V <sub>теор.</sub> , м³/м³ газа | Жаропроизводительность, °С |                                        |                                       |
|----------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------|----------------|----------------|------|----------------|-----------------|----------------|-------------------------------------------------------------------|----------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|
|                                                                      | CO <sub>2</sub>         | O <sub>2</sub> | C <sub>m</sub> | H <sub>n</sub> | CO   | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | N <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> +<br>C <sub>2</sub> H <sub>10</sub> | Q <sub>B</sub> |                                                               |                                                          | Q <sub>H</sub>             | без учета влаги воздуха t <sub>ж</sub> | с учетом влаги воздуха t <sub>ж</sub> |
|                                                                      |                         |                |                |                |      |                |                 |                |                                                                   |                |                                                               |                                                          |                            |                                        |                                       |
| Газы высокой жаропроизводительности:                                 |                         |                |                |                |      |                |                 |                |                                                                   |                |                                                               |                                                          |                            |                                        |                                       |
| водяной газ                                                          | 6,3                     | 0,2            | —              | —              | 38   | 51             | 0,5             | 4,0            | —                                                                 | 11514          | 10467                                                         | 2,2                                                      | 2,7                        | 2210                                   | 2180                                  |
| газ, полученный при газификации под высоким давлением (2,5 МН/м²)    | 3                       | 0,3            | 0,7            | 27             | 18   | 56             | 18              | 4,0            | —                                                                 | 17124          | 15114                                                         | 3,5                                                      | 4,2                        | 2130                                   | 2100                                  |
| газ нефтезаводской (Москва)                                          | —                       | —              | —              | —              | 3    | 12             | 58              | —              | 50+50                                                             | 42161          | 38435                                                         | 9,9                                                      | 10,8                       | 2120                                   | 2090                                  |
| сжиженный газ                                                        | 15                      | 0,2            | 0,8            | —              | 27   | 46             | 8               | 3              | —                                                                 | 113797         | 104670                                                        | 27,4                                                     | 29,6                       | 2110                                   | 2080                                  |
| двойной водяной газ                                                  | 3                       | 1              | 2              | 7              | 58   | 39             | 25              | 4              | —                                                                 | 13063          | 11807                                                         | 2,6                                                      | 3,2                        | 2100                                   | 2070                                  |
| коксовый газ из доменных углей                                       | 20,3                    | 0,2            | 0,5            | 34             | 39   | 3              | 3               | 3              | —                                                                 | 20306          | 18003                                                         | 4,3                                                      | 5,0                        | 2120                                   | 2090                                  |
| паро-кислородный газ                                                 | 15                      | —              | 3              | 39             | 16   | 39             | 24              | 3              | —                                                                 | 10844          | 9923                                                          | 2,1                                                      | 2,7                        | 2050                                   | 2020                                  |
| коксовый газ из сланца                                               | 1,0                     | —              | —              | —              | —    | —              | 20—60           | 3—10           | 20—30                                                             | 18467          | 16580                                                         | 4,0                                                      | 4,7                        | 2040                                   | 2010                                  |
| нефтепромысловый газ*                                                | —                       | —              | —              | —              | —    | —              | —               | —              | —                                                                 | —              | 62802                                                         | 12,2                                                     | 13,2                       | 2030                                   | 2000                                  |
| газ полукоксовый из каменных углей                                   | 13                      | —              | 7              | 9              | 9    | 9              | 54              | 8              | —                                                                 | 28219          | 25539                                                         | 6,6                                                      | 7,5                        | 2060                                   | 2030                                  |
| природный газ                                                        | —                       | —              | —              | —              | —    | —              | 98              | 2              | —                                                                 | 39523          | 35462                                                         | 9,4                                                      | 10,4                       | 2040                                   | 2010                                  |
| Газы средней жаропроизводительности:                                 |                         |                |                |                |      |                |                 |                |                                                                   |                |                                                               |                                                          |                            |                                        |                                       |
| смешанный газ (50% коксового и 50% доменного газов)                  | 7                       | —              | 1              | 17             | 30   | 30             | 13              | 32             | —                                                                 | 12100          | 10969                                                         | 2,5                                                      | 3,3                        | 1980                                   | 1950                                  |
| генераторный газ из битуминозных топлив (прямой процесс газификации) | 7                       | 0,2            | 0,3            | 28             | 13   | 13             | 2,5             | 49             | —                                                                 | 6406           | 6029                                                          | 1,2                                                      | 2,0                        | 1750                                   | 1720                                  |
| Газы пониженной жаропроизводительности:                              |                         |                |                |                |      |                |                 |                |                                                                   |                |                                                               |                                                          |                            |                                        |                                       |
| смешанный генераторный газ из тощих топлив                           | 6                       | —              | —              | 27             | 13   | 13             | 0,6             | 53,4           | —                                                                 | 5317           | 5024                                                          | 1,0                                                      | 1,8                        | 1670                                   | 1640                                  |
| доменный газ (древесноугольный)                                      | 12                      | —              | —              | 27             | 8    | 8              | 1,8             | 51,2           | —                                                                 | 5150           | 4899                                                          | 1,0                                                      | 1,9                        | 1590                                   | 1560                                  |
| воздушный газ                                                        | 1                       | —              | —              | —              | 32,5 | 0,5            | —               | 66             | —                                                                 | 4187           | 4145                                                          | 0,8                                                      | 1,6                        | 1560                                   | 1530                                  |

| Газы                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Состав газа, % объема.) |                |                               |             |                |                 |                | Теплота сгорания газа, кДж/м³                                  |                | Теоретический расход воздуха $L_{теор}$ , м³/м³ газа | Объем продуктов сгорания $V_{теор}$ , м³/м³ газа | Жаропроизводительность, °C |                                 |                                |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------|-------------------------------|-------------|----------------|-----------------|----------------|----------------------------------------------------------------|----------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | CO <sub>2</sub>         | O <sub>2</sub> | C <sub>m</sub> H <sub>n</sub> | CO          | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | N <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> + C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | Q <sub>B</sub> |                                                      |                                                  | Q <sub>A</sub>             | без учета влаги воздуха $t_{ж}$ | с учетом влаги воздуха $t_{ж}$ |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                         |                |                               |             |                |                 |                |                                                                |                |                                                      |                                                  |                            |                                 |                                |
| газы низкой жаропроизводительности:<br>доменный газ (коксовый)<br>ваграночный газ с использованием физического тепла ( $t=600^{\circ}\text{C}$ )<br>продувочный газ (антрацитовый) с использованием физического тепла ( $t=600^{\circ}\text{C}$ )<br>газ сажевых заводов<br>продувочный газ (коксовый) с использованием физического тепла | 10,5                    | —              | —                             | 28          | 2,7            | 0,3             | 58,5           | —                                                              | 4020           | 3936                                                 | 0,8                                              | 1,6                        | 1470                            | 1400                           |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 13,1                    | —              | —                             | 13,1        | —              | —               | 73,8           | —                                                              | 1675           | 1674                                                 | 0,3                                              | 1,2                        | 1250                            | 1230                           |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 14,5<br>4,8             | 0,2<br>1,4     | —<br>—                        | 8,8<br>4,9  | 2,3<br>11,6    | 0,2<br>2,0      | 74<br>75,3     | —<br>—                                                         | 1507<br>2931   | 1424<br>2596                                         | 0,3<br>0,5                                       | 1,2<br>1,4                 | 1180<br>1180                    | 1160<br>1160                   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 17,5<br>13,1            | 0,2<br>—       | —<br>—                        | 5,0<br>13,1 | 1,3<br>—       | —<br>—          | 76<br>73,8     | —<br>—                                                         | 795<br>1675    | 754<br>1675                                          | 0,1<br>0,3                                       | 1,1<br>1,2                 | 950<br>860                      | 930<br>840                     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 14,5                    | 0,2            | —                             | 8,8         | 2,3            | 0,2             | 74             | —                                                              | 1507           | 1424                                                 | 0,3                                              | 1,2                        | 770                             | 750                            |
| продувочный (коксовый) газ холодный                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 17,5                    | 0,2            | —                             | 5,0         | 1,3            | —               | 76             | —                                                              | 795            | 754                                                  | 0,1                                              | 1,1                        | 470                             | 450                            |

\* Содержание этана 12—20% (см. табл. VII-8)

\* Содержание этана 12–20% (см. табл. VII-8)

## Таблица VIII-9

## Теплотехнические характеристики некоторых нефтепромысловых (попутных) газов

| Месторождение | Теоретический<br>объем воздуха<br>$L_{\text{теор}}$ , м³/м³ | Объем продуктов сго-<br>рания, м³/м³ |                   | Отношение<br>объемов сухих<br>и влажных<br>продуктов<br>сгорания $B$ | Энтальпия продуктов сго-<br>рания, кДж/м³ |                | Жаропроизво-<br>дительность<br>(при сжигании<br>в абсолютном<br>сухом возду-<br>хе) $t^{\circ}\text{ж}$ , °C | Жаропроизво-<br>дительность<br>(при сжигании<br>в воздухе, со-<br>держащем 1%<br>влаги) $t^{\circ}\text{ж}$ , °C | $\text{RO}_2$<br>сухих продук-<br>тов сгорания,<br>% (обычн.) |
|---------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
|               |                                                             | $V_{\text{сух}}$                     | $V_{\text{теор}}$ |                                                                      | $i_{\text{в}}^{\text{сух}}$               | $i_{\text{в}}$ |                                                                                                              |                                                                                                                  |                                                               |
|               |                                                             |                                      |                   |                                                                      |                                           |                |                                                                                                              |                                                                                                                  |                                                               |
| Туймазинское  | 12,3                                                        | 11,5                                 | 13,7              | 0,81                                                                 | 4061                                      | 3433           | 2040                                                                                                         | 2010                                                                                                             | 13,0                                                          |
| Туймазинское  | 15,6                                                        | 14,2                                 | 17,1              | 0,83                                                                 | 4187                                      | 3475           | 2080                                                                                                         | 2050                                                                                                             | 13,2                                                          |
| Мушановское   | 14,6                                                        | 13,3                                 | 16,0              | 0,83                                                                 | 4145                                      | 3475           | 2080                                                                                                         | 2050                                                                                                             | 13,0                                                          |
| Мушановское   | 16,1                                                        | 14,7                                 | 17,6              | 0,83                                                                 | 4187                                      | 3475           | 2080                                                                                                         | 2050                                                                                                             | 13,2                                                          |
| Ромашкинское  | 15,6                                                        | 14,3                                 | 17,1              | 0,83                                                                 | 4187                                      | 3475           | 2080                                                                                                         | 2050                                                                                                             | 13,2                                                          |
| Шугуровское   | 8,7                                                         | 8,4                                  | 9,9               | 0,84                                                                 | 3936                                      | 3308           | 1970                                                                                                         | 1940                                                                                                             | 12,6                                                          |

Примечание. Теплотехнические характеристики подсчитаны для газов, состав которых приведен в табл. VII-8

Примечание. Теплотехнические характеристики подсчитаны для газов, состав которых приведен в табл. VII-8

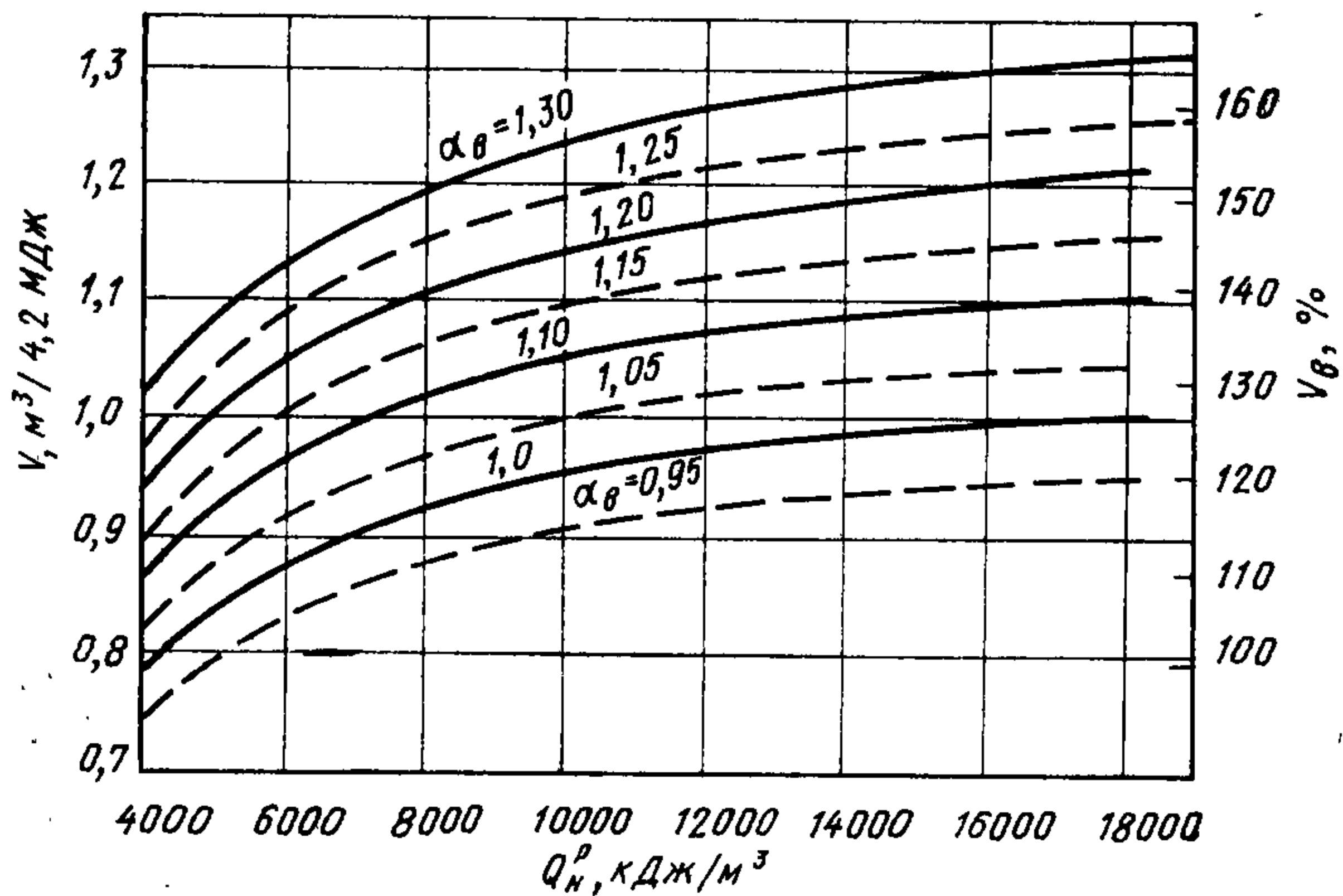


Рис. 62. Зависимость количества  $V_B$ , потребного для сжигания коксодоменой смеси, от теплоты сгорания газа  $Q_H^P$  и коэффициента расхода воздуха  $\alpha_B$ . За 100% принято количество воздуха, необходимое для сжигания доменного газа при  $\alpha \approx 1$

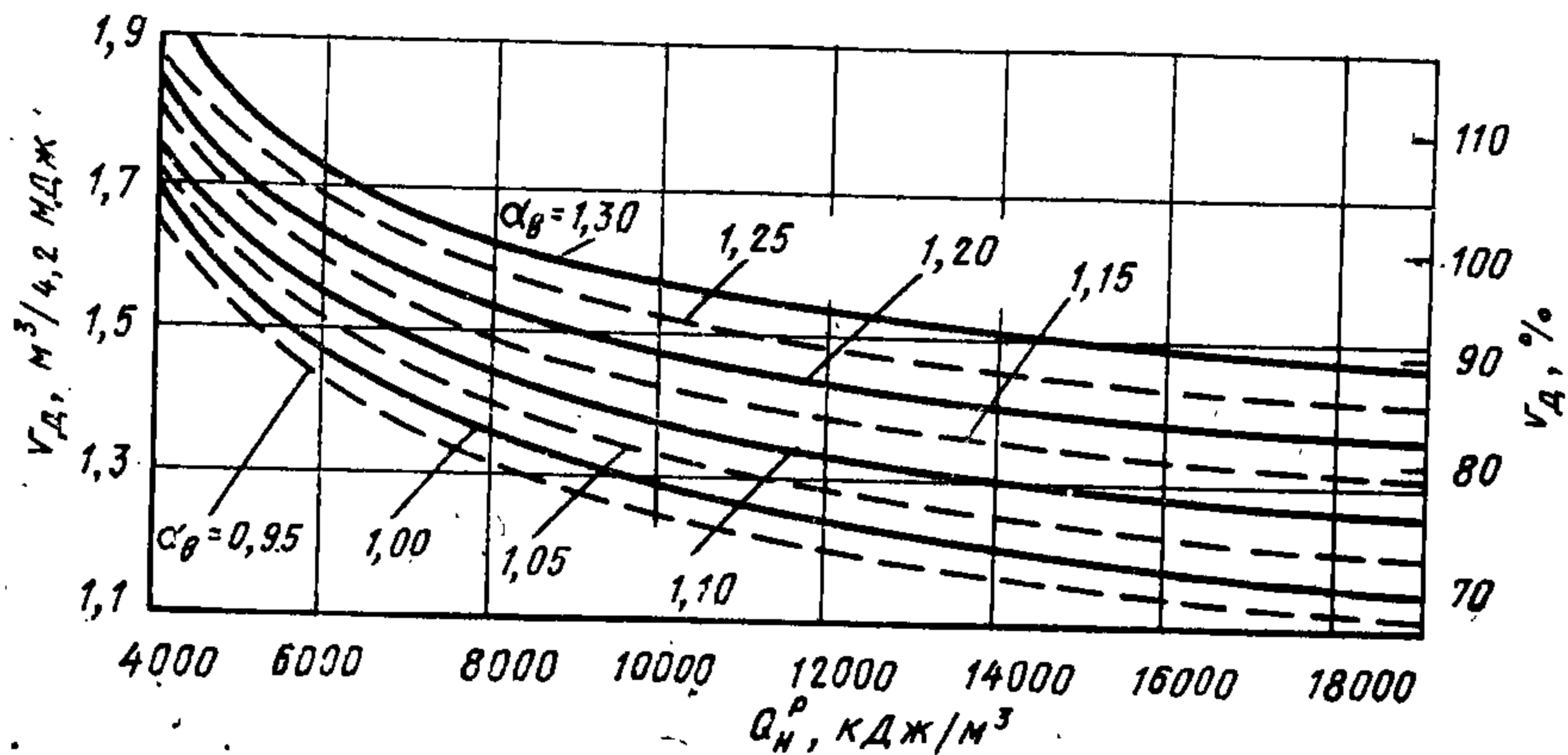


Рис. 63. Зависимость количества дыма  $V_D$  от теплоты сгорания смешанного газа  $Q_H^P$  и коэффициента расхода воздуха  $\alpha_B$ . За 100% принято количество продуктов сгорания, образующихся при сжигании доменного газа при  $\alpha = 1$ .

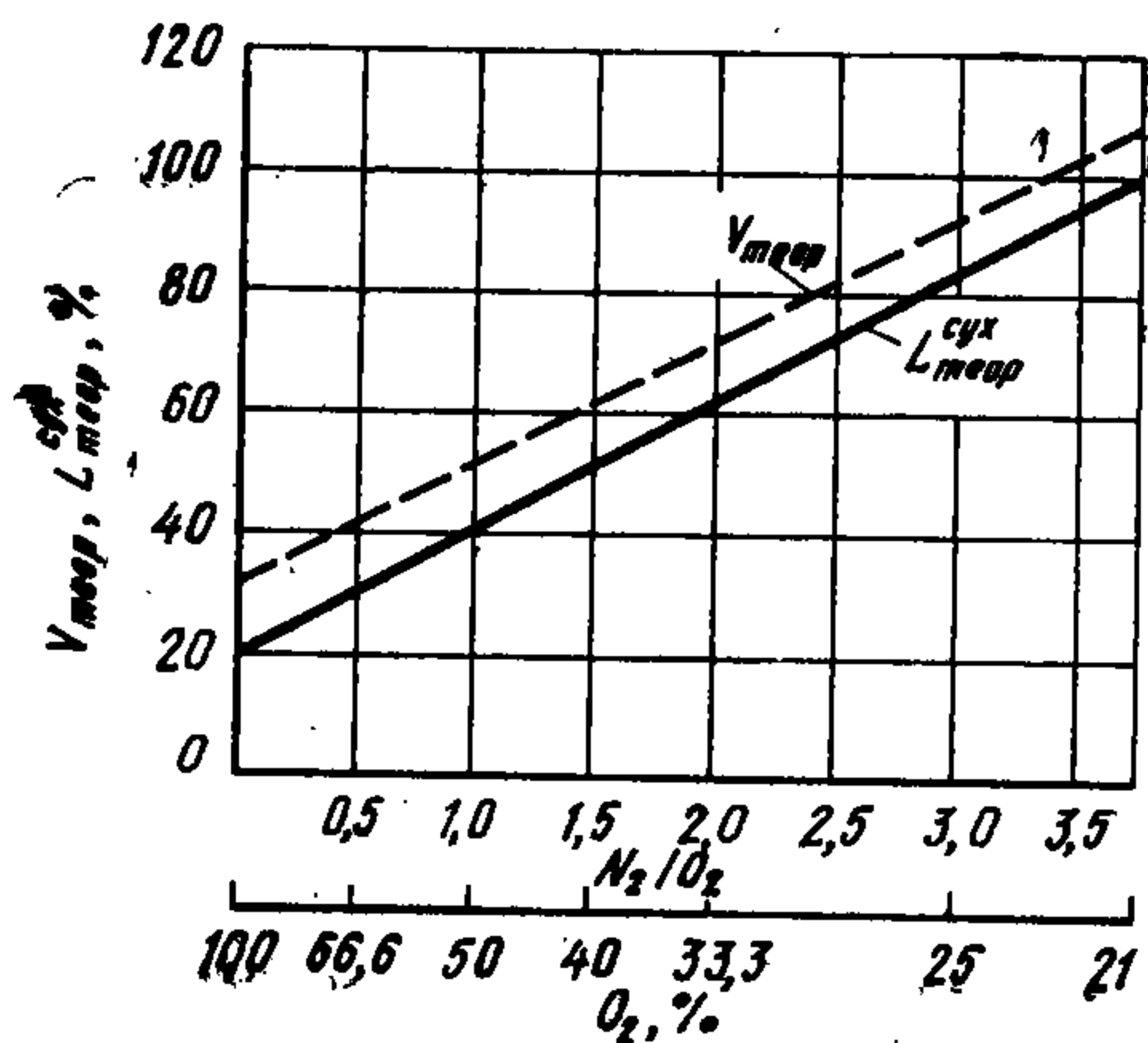


Рис. 64. Зависимость расхода сухого воздуха  $L_{\text{теор}}^{\text{сух}}$  и выхода продуктов сгорания  $V_{\text{теор}}$  от содержания кислорода в дутье

Таблица VIII-10

Состав и теплотехнические характеристики некоторых коксовых газов

| Газы<br>(условное<br>обозначение) | Состав газов, % (объемн.). |          |        |       |      |        |       |       | Теплота<br>сгорания<br>$Q_p$ ,<br>кДж/м³ | Объем су-<br>хих про-<br>дуктов<br>сгорания<br>$V_{сух}$ ,<br>м³/м³ | Объем<br>продуктов<br>сгорания<br>$V_{теор}$ ,<br>м³/м³ | Отношение<br>сухих и<br>влажных<br>продуктов<br>сгорания<br>$B$ | Максимальное<br>содержание<br>$CO_2$ в про-<br>дуктах сгора-<br>ния $RO_2^{max}$ ,<br>% (объемн.) | Энтальпия<br>сухих продук-<br>тов сгорания<br>$i_{сух}$ ,<br>кДж/м³ | Энтальпия<br>продуктов<br>сгорания<br>$i_v$ ,<br>кДж/м³ | Жаропро-<br>изводя-<br>тельность<br>$t_{ж}$ , °C |
|-----------------------------------|----------------------------|----------|--------|-------|------|--------|-------|-------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
|                                   | $C_2H_4$                   | $C_3H_6$ | $CH_4$ | $H_2$ | $CO$ | $CO_2$ | $N_2$ | $O_2$ |                                          |                                                                     |                                                         |                                                                 |                                                                                                   |                                                                     |                                                         |                                                  |
|                                   |                            |          |        |       |      |        |       |       |                                          |                                                                     |                                                         |                                                                 |                                                                                                   |                                                                     |                                                         |                                                  |
| 1                                 | 5,6                        | —        | 28,2   | 50,5  | 8,7  | 2,1    | 4,5   | 0,4   | 19929                                    | 4,40                                                                | 5,58                                                    | 0,79                                                            | 11,4                                                                                              | 4522                                                                | 3559                                                    | 2130                                             |
| 1а                                | —                          | 5,6      | 28,2   | 50,5  | 8,7  | 2,2    | 4,5   | 0,4   | 21436                                    | 4,78                                                                | 6,02                                                    | 0,80                                                            | 11,7                                                                                              | 4480                                                                | 3559                                                    | 2130                                             |
| 2                                 | 2                          | —        | 22     | 56    | 6,0  | 3      | 10    | 1     | 15826                                    | 3,47                                                                | 4,51                                                    | 0,77                                                            | 10,1                                                                                              | 4564                                                                | 3517                                                    | 2100                                             |
| 2а                                | —                          | 2        | 22     | 56    | 6,0  | 3      | 10    | 1     | 16370                                    | 3,59                                                                | 4,65                                                    | 0,77                                                            | 10,3                                                                                              | 4605                                                                | 3517                                                    | 2100                                             |
| 3                                 | 2,4                        | —        | 26,7   | 58    | 7,0  | 2,9    | 2,5   | 0,5   | 18087                                    | 3,91                                                                | 5,08                                                    | 0,77                                                            | 10,6                                                                                              | 4626                                                                | 3559                                                    | 2130                                             |
| 3а                                | —                          | 2,4      | 26,7   | 58    | 7,0  | 2,9    | 2,5   | 0,5   | 18715                                    | 4,07                                                                | 5,25                                                    | 0,77                                                            | 10,7                                                                                              | 4605                                                                | 3559                                                    | 2130                                             |

Состав и наименование газа. 1а — из пропилена  $C_3H_6$ . а в газах 1а, 2а, 3а — из пропилена  $C_3H_6$ .

Примечание. В коксовых газах 1, 2, 3 тяжелые углеводороды состоят из этилена  $C_2H_4$ , а в газах 1а, 2а, 3а — из пропилена  $C_3H_6$ .

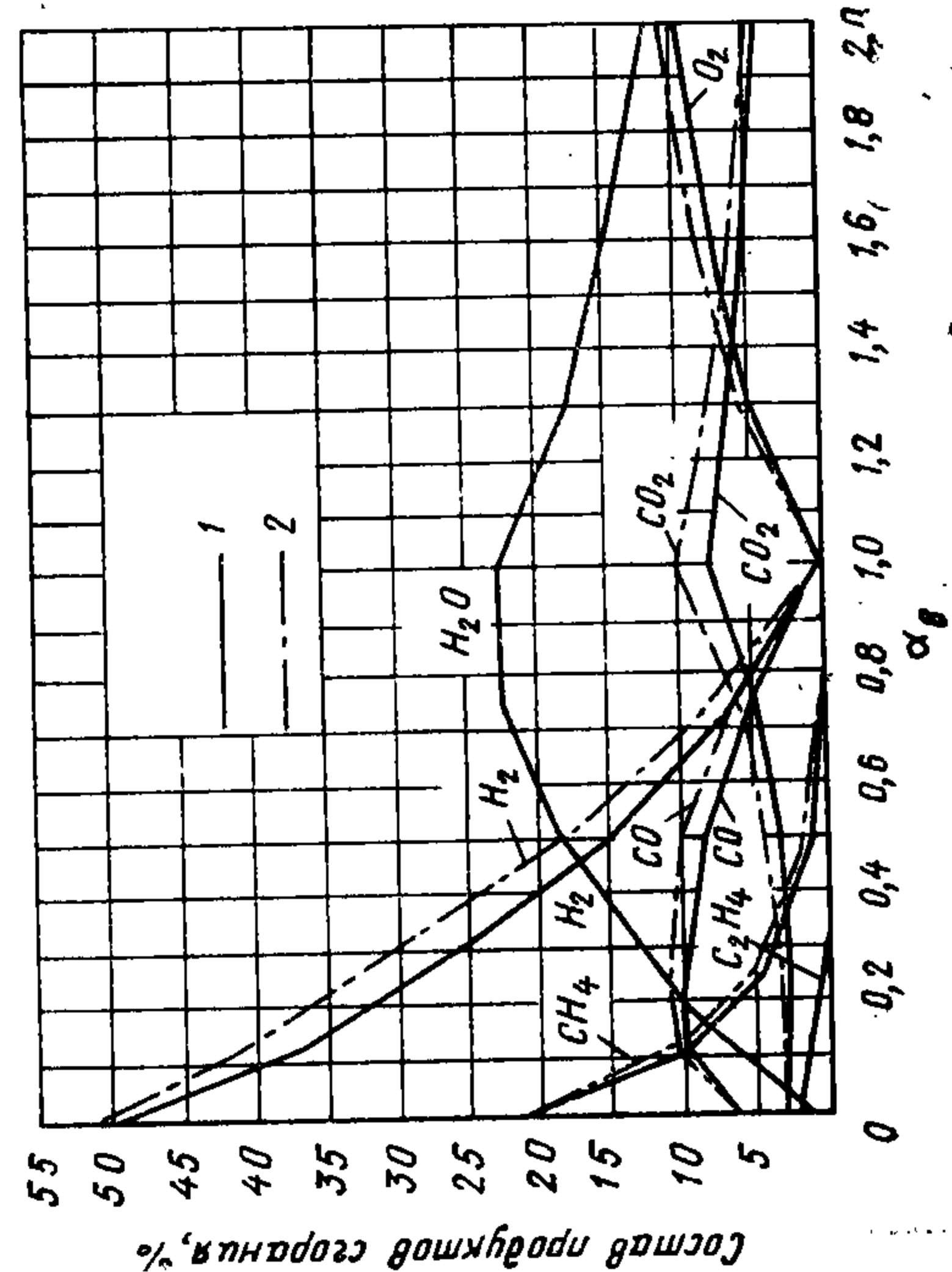


Рис. 65. Зависимость состава продуктов сгорания при сжигании коксового газа от коэффициентов расхода воздуха  $\alpha_v$  при влажных (1) и сухих (2) продуктах сгорания

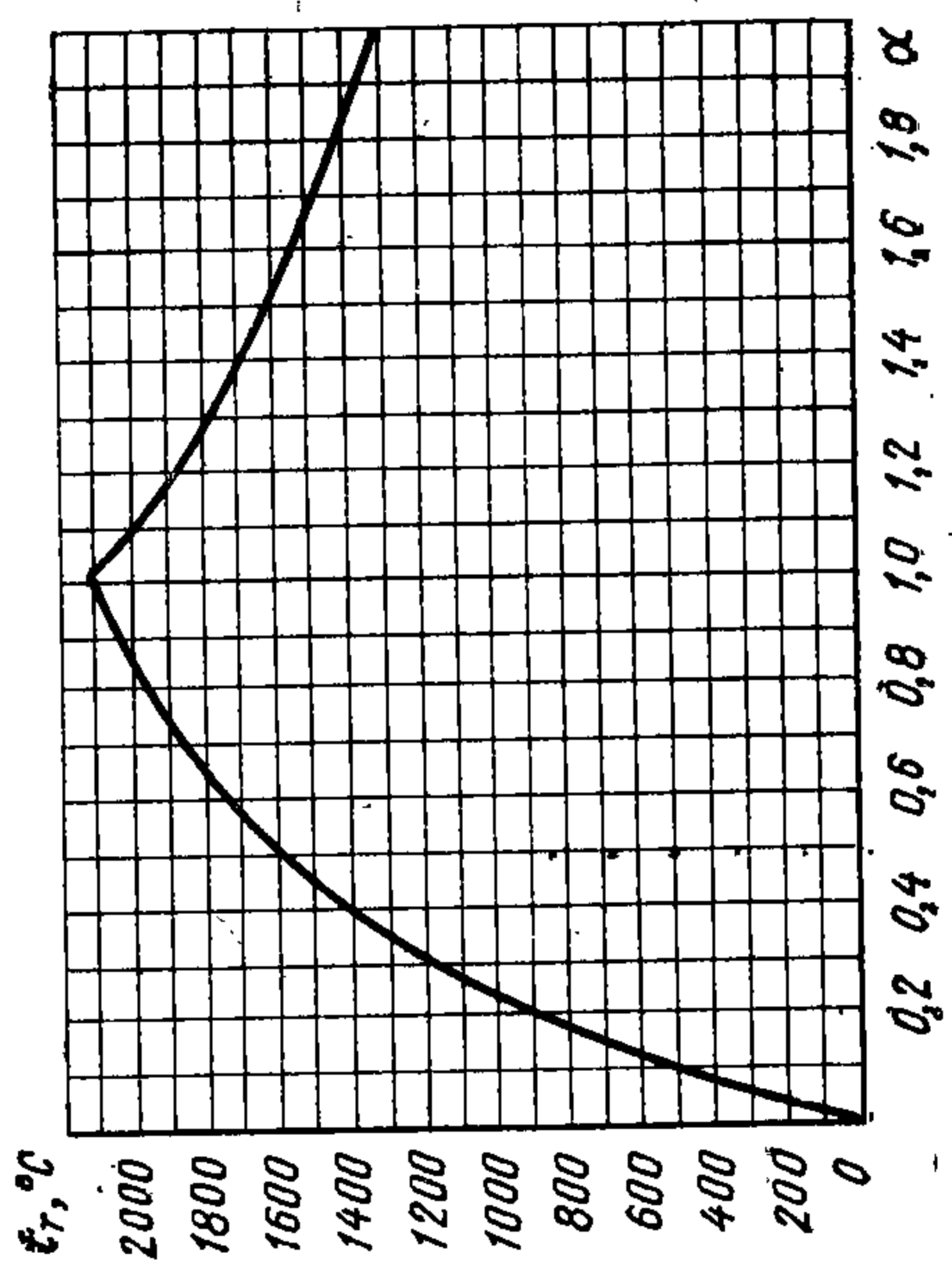


Рис. 66. Зависимость теоретической температуры  $t_t$  горения коксового газа от коэффициента расхода воздуха

## Сравнительные теплотехнические характеристики различных топлив

| Наименование топлива                                                            | Плотность $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup> | Низшая объемная теплота сгорания $Q_{об}$ , МДж/м <sup>3</sup> | Низшая массовая теплота сгорания $Q_{масс}$ , МДж/кг | Теоретический расход воздуха $L_{теор}$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> газа | Расход воздуха на 1000 кДж, $L_{1000}$ , м <sup>3</sup> /1000 кДж, на 4,2 МДж, $L_{4,2}$ (м <sup>3</sup> /4,2) | Объем продуктов сгорания $V_{теор}$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> газа | Объем продуктов сгорания на 1000 кДж; $V_{1000}$ , м <sup>3</sup> /1000 кДж, на 4,2 МДж, $V_{4,2}$ (м <sup>3</sup> /4,2) | Плотность продуктов сгорания $\rho_{огх}$ , г, кг/м <sup>3</sup> |
|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Углерод аморфный . . . . .                                                      | —                                      | —                                                              | 34,1                                                 | 8,90*                                                                         | 0,260<br>(1,09)                                                                                                | 8,90*                                                                     | 0,260<br>(1,09)                                                                                                          | 1,40                                                             |
| Водород . . . . .                                                               | 0,090                                  | 10,8                                                           | 121,0                                                | 2,38                                                                          | 0,220<br>(0,920)                                                                                               | 2,88                                                                      | 0,268<br>(1,12)                                                                                                          | 1,09                                                             |
| Окись углерода . . . . .                                                        | 1,250                                  | 12,77                                                          | 10,13                                                | 2,38                                                                          | 0,188<br>(0,788)                                                                                               | 2,88                                                                      | 0,227<br>(0,95)                                                                                                          | 1,50                                                             |
| Метан . . . . .                                                                 | 0,715                                  | 35,8                                                           | 50,25                                                | 9,52                                                                          | 0,265<br>(1,11)                                                                                                | 10,52                                                                     | 0,294<br>(1,23)                                                                                                          | 1,23                                                             |
| Этан . . . . .                                                                  | 1,358                                  | 63,8                                                           | 47,5                                                 | 16,66                                                                         | 0,260<br>(1,09)                                                                                                | 18,16                                                                     | 0,284<br>(1,19)                                                                                                          | 1,25                                                             |
| Пропан . . . . .                                                                | 2,030                                  | 91,4                                                           | 46,4                                                 | 23,80                                                                         | 0,260<br>(1,09)                                                                                                | 25,80                                                                     | 0,284<br>(1,19)                                                                                                          | 1,26                                                             |
| Бутан . . . . .                                                                 | 2,710                                  | 119,0                                                          | 45,8                                                 | 30,94                                                                         | 0,257<br>(1,08)                                                                                                | 33,44                                                                     | 0,281<br>(1,18)                                                                                                          | 1,27                                                             |
| Пентан . . . . .                                                                | 3,214                                  | 146,0                                                          | 45,5                                                 | 38,08                                                                         | 0,260<br>(1,09)                                                                                                | 41,08                                                                     | 0,281<br>(1,18)                                                                                                          | 1,27                                                             |
| Сероводород . . . . .                                                           | 1,52                                   | 22,3                                                           | 29,1                                                 | 7,14                                                                          | 0,262<br>(1,10)                                                                                                | 7,64                                                                      | 0,327<br>(1,37)                                                                                                          | 1,28                                                             |
| Природный газ:                                                                  |                                        |                                                                |                                                      |                                                                               |                                                                                                                |                                                                           |                                                                                                                          |                                                                  |
| дашавский . . . . .                                                             | 0,730                                  | 36,0                                                           | 49,0                                                 | 9,52                                                                          | 0,262<br>(1,10)                                                                                                | 10,86                                                                     | 0,288<br>(1,21)                                                                                                          | 1,21                                                             |
| саратовский . . . . .                                                           | 0,780                                  | 35,18                                                          | 44,80                                                | 9,23                                                                          | 0,263<br>(1,10)                                                                                                | 10,30                                                                     | 0,292<br>(1,22)                                                                                                          | 1,17                                                             |
| ставропольский . . . . .                                                        | 0,735                                  | 35,18                                                          | 47,30                                                | 9,30                                                                          | 0,263<br>(1,10)                                                                                                | 10,42                                                                     | 0,296<br>(1,24)                                                                                                          | 1,19                                                             |
| шебелинский . . . . .                                                           | 0,782                                  | 37,21                                                          | 48,20                                                | 9,85                                                                          | 0,263<br>(1,10)                                                                                                | 10,90                                                                     | 0,287<br>(1,20)                                                                                                          | 1,25                                                             |
| Коксовый газ . . . . .                                                          | 0,590                                  | 16,71                                                          | 27,75                                                | 4,06                                                                          | 0,244<br>(1,02)                                                                                                | 4,82                                                                      | 0,289<br>(1,21)                                                                                                          | 1,16                                                             |
| Водяной газ . . . . .                                                           | 0,670                                  | 10,05                                                          | 16,71                                                | 2,19                                                                          | 0,211<br>(0,88)                                                                                                | 2,74                                                                      | 0,263<br>(1,10)                                                                                                          | 1,28                                                             |
| Доменный газ . . . . .                                                          | 1,30                                   | 4,18                                                           | 3,22                                                 | 0,82                                                                          | 0,196<br>(0,82)                                                                                                | 1,67                                                                      | 0,403<br>(1,675)                                                                                                         | 1,40                                                             |
| Смесь коксового и доменного газов $Q_{н}^P = 8,37$ МДж/м <sup>3</sup> . . . . . | 1,03                                   | 8,37                                                           | 8,25                                                 | 1,91                                                                          | 0,227<br>(0,95)                                                                                                | 2,72                                                                      | 0,325<br>(1,360)                                                                                                         | 1,29                                                             |
| Генераторный газ ( $Q_{н}^P = 4,77$ МДж/м <sup>3</sup> ) . . . . .              | 1,04                                   | 4,77                                                           | 4,61                                                 | 1,00                                                                          | 0,211<br>(0,88)                                                                                                | 1,85                                                                      | 0,387<br>(1,62)                                                                                                          | 1,34                                                             |
| Мазут:                                                                          |                                        |                                                                |                                                      |                                                                               |                                                                                                                |                                                                           |                                                                                                                          |                                                                  |
| распылитель — воздух . . . . .                                                  | —                                      | —                                                              | 43,4                                                 | 10,71*                                                                        | 0,246<br>(1,03)                                                                                                | 11,40*                                                                    | 0,263<br>(1,10)                                                                                                          | 1,28                                                             |
| распылитель — водяной пар . . . . .                                             | —                                      | —                                                              | 43,4                                                 | 10,71*                                                                        | 0,246<br>(1,03)                                                                                                | 12,64*                                                                    | 0,292<br>(1,22)                                                                                                          | 1,21                                                             |
| Каменный уголь (газовый) . . . . .                                              | —                                      | —                                                              | 25,58                                                | 7,10*                                                                         | 0,258<br>(1,08)                                                                                                | 7,48*                                                                     | 0,273<br>(1,14)                                                                                                          | 1,33                                                             |
| Антрацит . . . . .                                                              | —                                      | —                                                              | 31,40                                                | 7,28*                                                                         | 0,232<br>(0,97)                                                                                                | 7,62*                                                                     | 0,244<br>(1,02)                                                                                                          | 1,31                                                             |
| Кокс . . . . .                                                                  | —                                      | —                                                              | 23,10                                                | 7,24*                                                                         | 0,263<br>(1,1)                                                                                                 | 7,20*                                                                     | 0,260<br>(1,09)                                                                                                          | 1,30                                                             |

\* Подсчитаны на 1 кг топлива.

| Наименование топлива                                                | Масса продуктов сгорания на 1000 кДж $G_{отх.г.}$ , кг/1000 кДж (на 4,2 МДж, кг/4,2) | Объем воздуха и топлива, вступающих в реакцию $L + B$ , м <sup>3</sup> /1000 кДж, (м <sup>3</sup> /4,2) | Состав продуктов сгорания % (объёмы.) |                  |                | Удельная энтальпия продуктов сгорания $i_v$ , МДж/м <sup>3</sup> | Удельная энтальпия продуктов сгорания $i_v^G$ , МДж/кг | Жаропроизводительность $t_{ж.}^{\circ C}$ |
|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|------------------|----------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
|                                                                     |                                                                                      |                                                                                                         | CO <sub>2</sub>                       | H <sub>2</sub> O | N <sub>2</sub> |                                                                  |                                                        |                                           |
| Углерод аморфный . . . . .                                          | 0,365<br>(1,53)                                                                      | —                                                                                                       | 21,0                                  | —                | 79,0           | 3,83                                                             | 2,74                                                   | 2365                                      |
| Водород . . . . .                                                   | 0,294<br>(1,23)                                                                      | 0,313<br>(1,31)                                                                                         | —                                     | 34,7             | 65,3           | 3,75                                                             | 3,39                                                   | 2240                                      |
| Окись углерода . . . . .                                            | 0,340<br>(1,42)                                                                      | 0,268<br>(1,12)                                                                                         | 34,7                                  | —                | 65,3           | 4,33                                                             | 2,93                                                   | 2380                                      |
| Метан . . . . .                                                     | 0,361<br>(1,51)                                                                      | 0,266<br>(1,11)                                                                                         | 9,5                                   | 19,0             | 71,5           | 3,41                                                             | 3,45                                                   | 2040                                      |
| Этан . . . . .                                                      | 0,355<br>(1,49)                                                                      | 0,277<br>(1,16)                                                                                         | 11,0                                  | 16,5             | 72,5           | 3,49                                                             | 2,80                                                   | 2050                                      |
| Пропан . . . . .                                                    | 0,361<br>(1,51)                                                                      | 0,272<br>(1,14)                                                                                         | 11,6                                  | 15,4             | 73,0           | 3,54                                                             | 2,81                                                   | 2107                                      |
| Бутан . . . . .                                                     | 0,358<br>(1,50)                                                                      | 0,267<br>(1,12)                                                                                         | 12,0                                  | 15,0             | 73,0           | 3,55                                                             | 2,79                                                   | 2117                                      |
| Пентан . . . . .                                                    | 0,358<br>(1,50)                                                                      | 0,267<br>(1,12)                                                                                         | 12,2                                  | 14,6             | 73,2           | 3,55                                                             | 2,79                                                   | 2120                                      |
| Сероводород . . . . .                                               | 0,503<br>(2,11)                                                                      | 0,348<br>(1,46)                                                                                         | 13,0                                  | 13,0             | 74,0           | 3,27                                                             | 2,55                                                   | 1900                                      |
| Природный газ:                                                      |                                                                                      |                                                                                                         |                                       |                  |                |                                                                  |                                                        |                                           |
| дашавский . . . . .                                                 | 0,348<br>(1,46)                                                                      | 0,291<br>(1,22)                                                                                         | 9,26                                  | 21,00            | 69,74          | 3,35                                                             | 2,76                                                   | 2040                                      |
| саратовский . . . . .                                               | 0,342<br>(1,43)                                                                      | 0,292<br>(1,22)                                                                                         | 9,80                                  | 19,00            | 71,20          | 3,43                                                             | 3,93                                                   | 2060                                      |
| ставропольский . . . . .                                            | 0,347<br>(1,45)                                                                      | 0,292<br>(1,22)                                                                                         | 9,40                                  | 20,0             | 70,60          | 3,38                                                             | 2,72                                                   | 2040                                      |
| шебелинский . . . . .                                               | 0,361<br>(1,51)                                                                      | 0,290<br>(1,21)                                                                                         | 9,7                                   | 18,1             | 72,2           | 3,35                                                             | 2,68                                                   | 2020                                      |
| Коксовый газ . . . . .                                              | 0,335<br>(1,40)                                                                      | 0,304<br>(1,27)                                                                                         | 7,9                                   | 22,1             | 70,0           | 3,46                                                             | 2,98                                                   | 2070                                      |
| Водяной газ . . . . .                                               | 0,337<br>(1,41)                                                                      | 0,299<br>(1,25)                                                                                         | 6,4                                   | 28,6             | 65,0           | 3,85                                                             | 3,03                                                   | 2210                                      |
| Доменный газ . . . . .                                              | 0,557<br>(2,35)                                                                      | 0,435<br>(1,82)                                                                                         | 23,0                                  | 3,0              | 74,0           | 2,50                                                             | 1,78                                                   | 1487                                      |
| Смесь коксового и доменного газов $Q_H^P = 8,37$ МДж/м <sup>3</sup> | 0,418<br>(1,75)                                                                      | 0,347<br>(1,45)                                                                                         | 14,0                                  | 14,5             | 71,5           | 3,07                                                             | 2,36                                                   | 1824                                      |
| Генераторный газ ( $Q_H^P = 4,77$ МДж/м <sup>3</sup> ) . . . . .    | 0,519<br>(2,17)                                                                      | 0,418<br>(1,75)                                                                                         | 17,1                                  | 6,7              | 76,2           | 2,59                                                             | 1,94                                                   | 1600                                      |
| Мазут:                                                              |                                                                                      |                                                                                                         |                                       |                  |                |                                                                  |                                                        |                                           |
| распылитель — воздух . . . . .                                      | 0,336<br>(1,41)                                                                      | —                                                                                                       | 13,5                                  | 12,3             | 74,2           | 3,08                                                             | 2,93                                                   | 2245                                      |
| распылитель — водяной пар . . . . .                                 | 0,352<br>(1,47)                                                                      | —                                                                                                       | 10,7                                  | 21,0             | 68,3           | 3,39                                                             | 2,81                                                   | 2050                                      |
| Каменный уголь (газовый) . . . . .                                  | 0,364<br>(1,52)                                                                      | —                                                                                                       | 17,1                                  | 8,0              | 74,9           | 3,68                                                             | 2,78                                                   | 2180                                      |
| Антрацит . . . . .                                                  | 0,320<br>(1,34)                                                                      | —                                                                                                       | 21,1                                  | 3,0              | 75,9           | 4,12                                                             | 2,65                                                   | 2290                                      |
| Кокс . . . . .                                                      | 0,340<br>(1,42)                                                                      | —                                                                                                       | 20,5                                  | 1,3              | 78,2           | 4,03                                                             | 3,09                                                   | 2200                                      |

## КОЭФФИЦИЕНТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОПЛИВА

Определение качества отдельных видов топлива и их сравнительную оценку можно выполнять по различным показателям: теплоте сгорания, теоретической температуре горения, энтальпии 1 м<sup>3</sup> продуктов сгорания и др. Однако более удобной величиной является термодинамический коэффициент использования тепла топлива (КИТ) в промышленной печи. Это — универсальный коэффициент, отражающий одновременно термодинамическую, техническую и экономическую стороны проблемы использования топлива. Он учитывает не только внутренние свойства топлива, но и условия его использования в печи — недожог, обогащение дутья кислородом и др. Величину КИТ определяют с учетом возможности возвращения тепла в рабочее пространство печи за счет использования отходящих продуктов сгорания для подогрева газа и воздуха горения.

В трактовке И. Д. Семикина формула для определения коэффициента использования тепла топлива имеет вид:

$$\eta_T = \frac{Q_H^P + Q_{ф.г} + Q_{ф.в} - Q_d - q_{нед}}{Q_H^P},$$

где  $Q_H^P$  — низшая теплота сгорания топлива;

$Q_{ф.г}$  — физическое тепло газа, поступающего в рабочее пространство печи;

$Q_{ф.в}$  — физическое тепло воздуха, подаваемого для сжигания топлива;

$Q_d$  — физическое тепло дыма, покидающего рабочее пространство печи;

$q_{нед}$  — недожог топлива; химическое тепло дыма, оставшееся не выделенным в рабочем пространстве печи из-за химического или механического недожога, либо вследствие диссоциации молекул продуктов сгорания.

Расчет КИТ вдеут на 1 м<sup>3</sup> горючего газа, как правило, в границах объема рабочего пространства печи. Значения  $Q_{ф.г}$  и  $Q_{ф.в}$  представляют собой величины физического тепла, полученного за счет использования тепла отходящего дыма в рекуператорах или регенераторах. При подогреве компонентов горения за счет других источников тепла либо поступления в горячем виде, эту величину следует учитывать в  $Q_H^P$ .

Физический смысл КИТ состоит в том, что он показывает долю тепла топлива, оставшуюся в рабочем пространстве печи. Это то тепло, которое может быть использовано на покрытие потерь тепла рабочим пространством и совершение полезной работы нагрева материалов или изделий в печи. Остальная часть тепла уносится отходящими продуктами сгорания.

Значение КИТ теоретически может меняться от 0 до 1.

Величина КИТ для различных видов топлива в зависимости от температуры уходящего дыма, температуры подогрева газа и воздуха за счет тепла дыма и коэффициента расхода воздуха представлена на рис. 67--73.

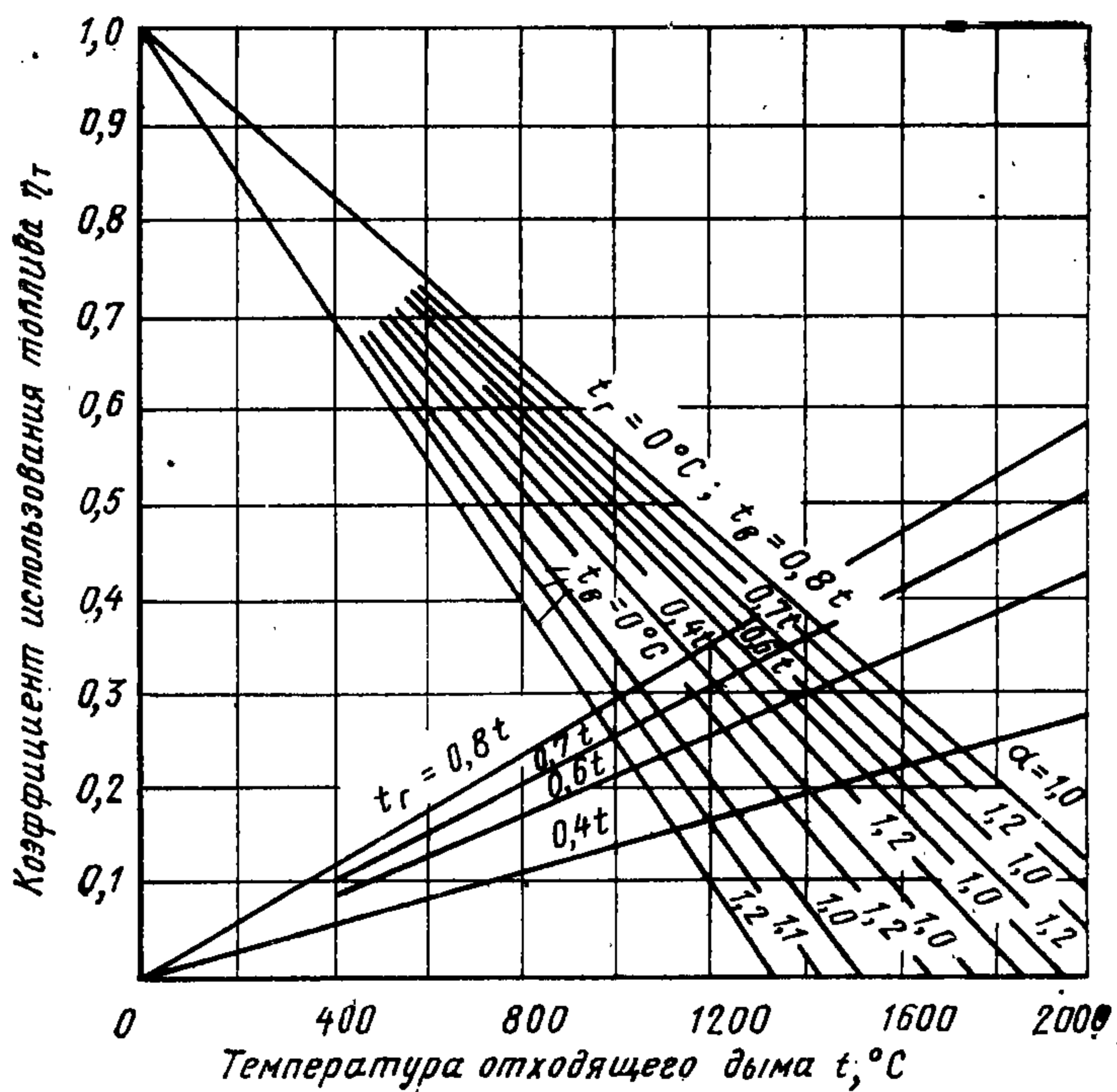


Рис. 67. Коэффициент использования тепла КИТ  $\eta_T$  доменного газа.  $Q_{\text{H}}^{\text{Д.Г}} = 4174 \text{ кДж/м}^3$

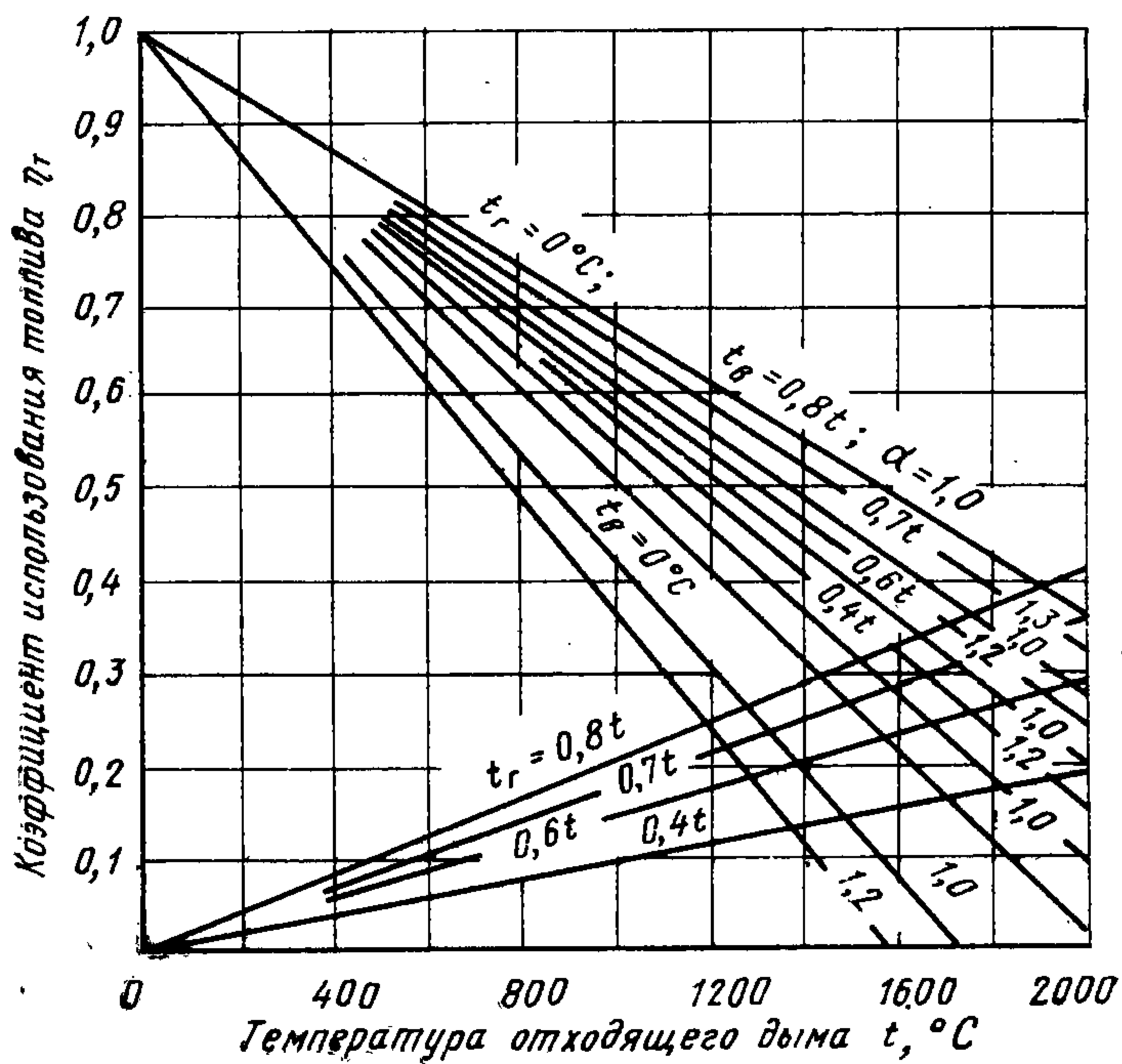


Рис. 68. Коэффициент использования тепла  $\eta_T$  генераторного газа с  $Q_{\text{H}}^{\text{Г.Г}} = 6070 \text{ кДж/м}^3$

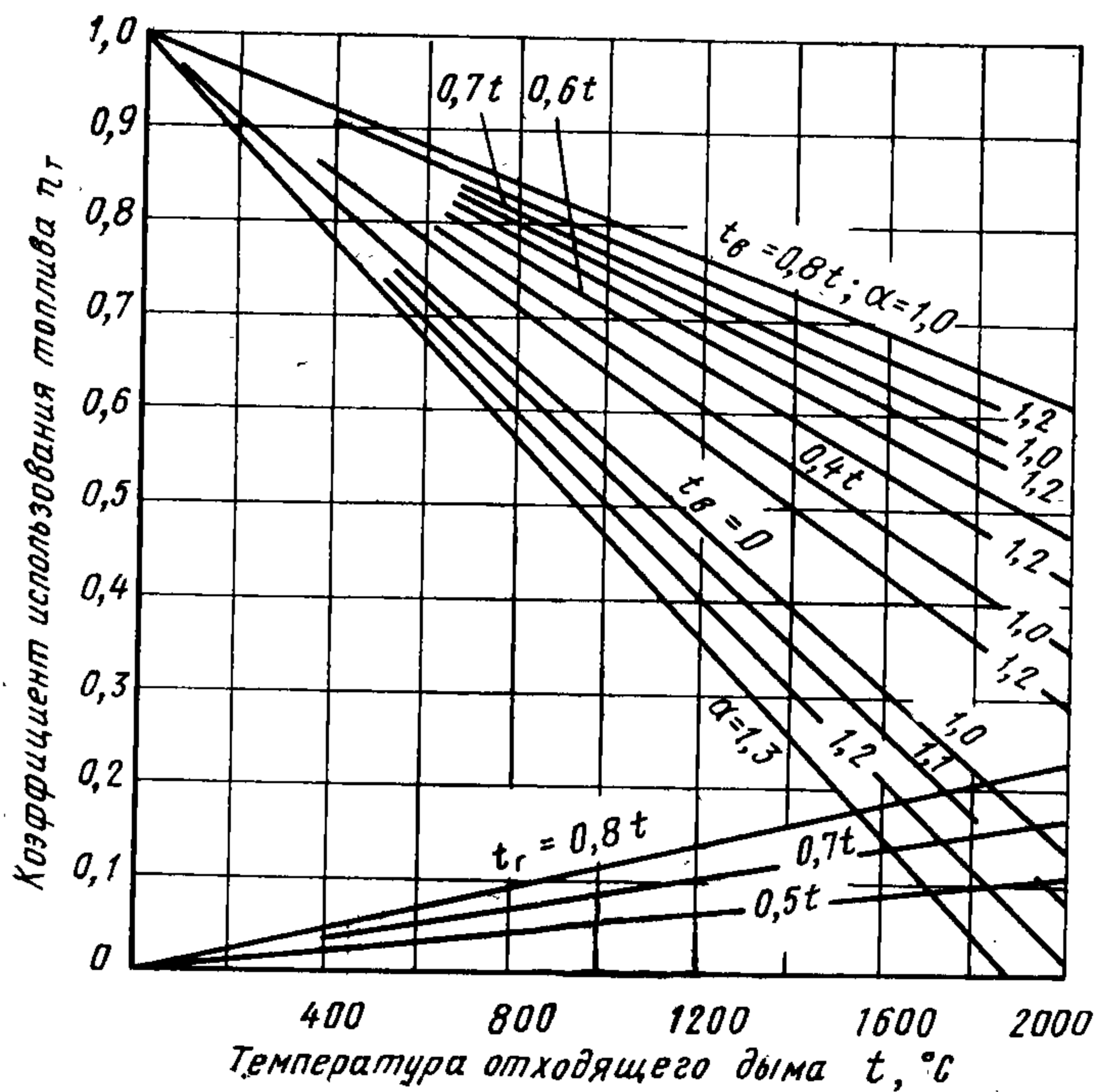


Рис. 69. Коэффициент использования тепла  $\eta_T$  водяного газа с теплотой сгорания  $Q_{\text{н}}^{\text{в.г}} = 10467 \text{ кДж/м}^3$

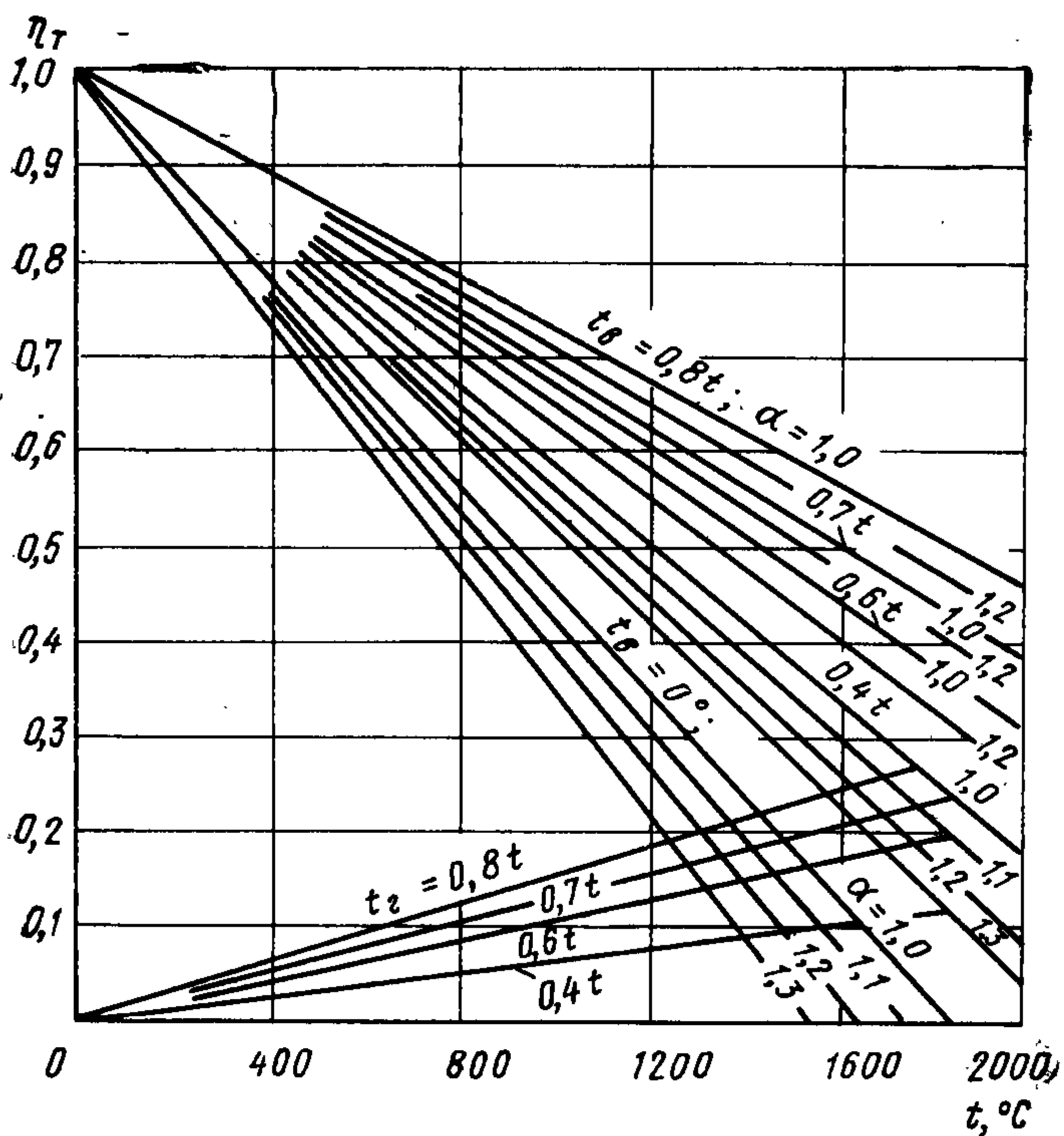


Рис. 70. Коэффициент использования тепла  $\eta_T$  смеси коксового и доменного газов с  $Q_{\text{н}}^{\text{к.д}} = 8374 \text{ кДж/м}^3$

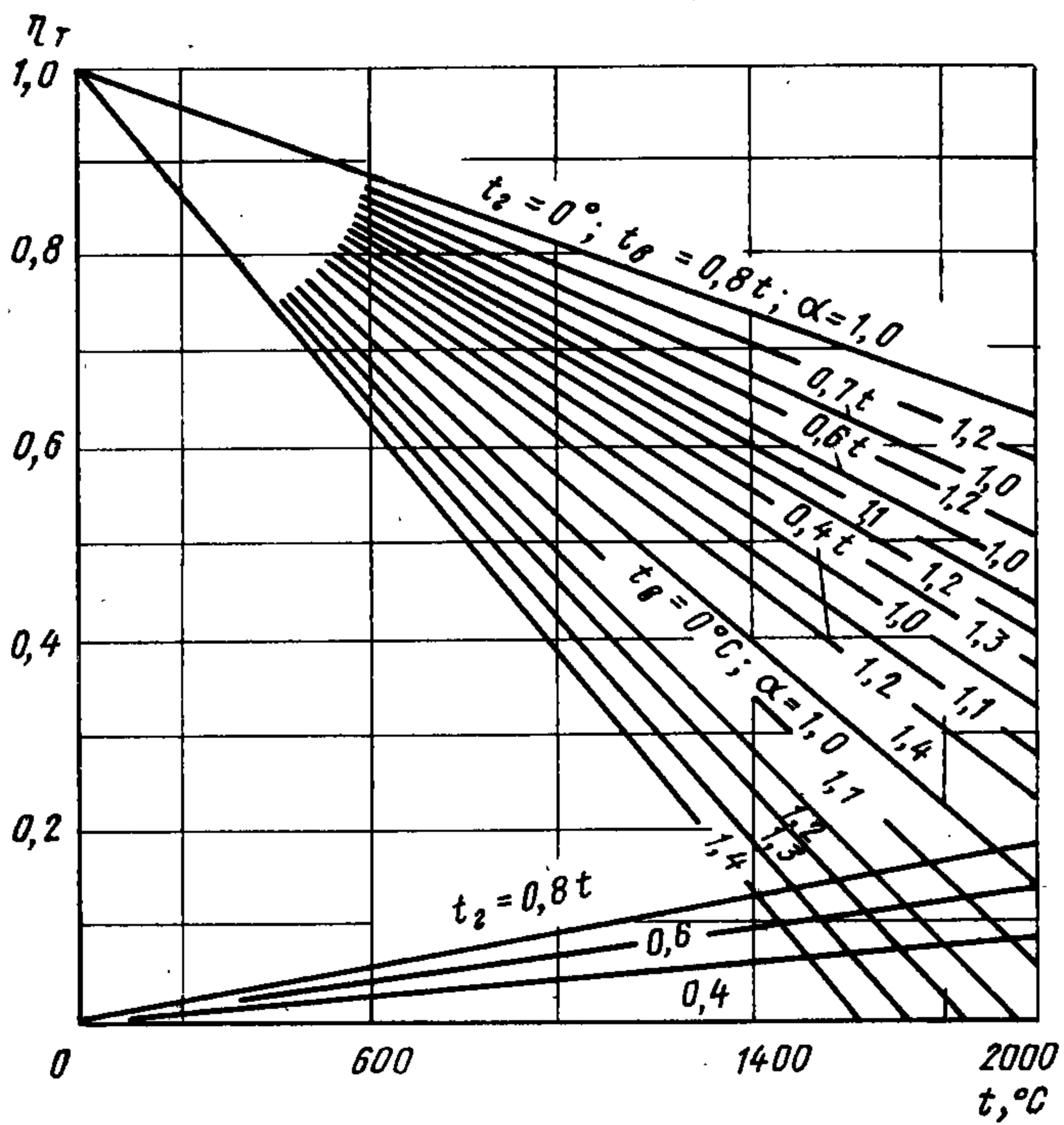


Рис. 71. Коэффициент использования тепла  $\eta_T$  коксового газа с теплотой сгорания  $Q^{\text{К.Г}} = 16660 \text{ кДж/м}^3$

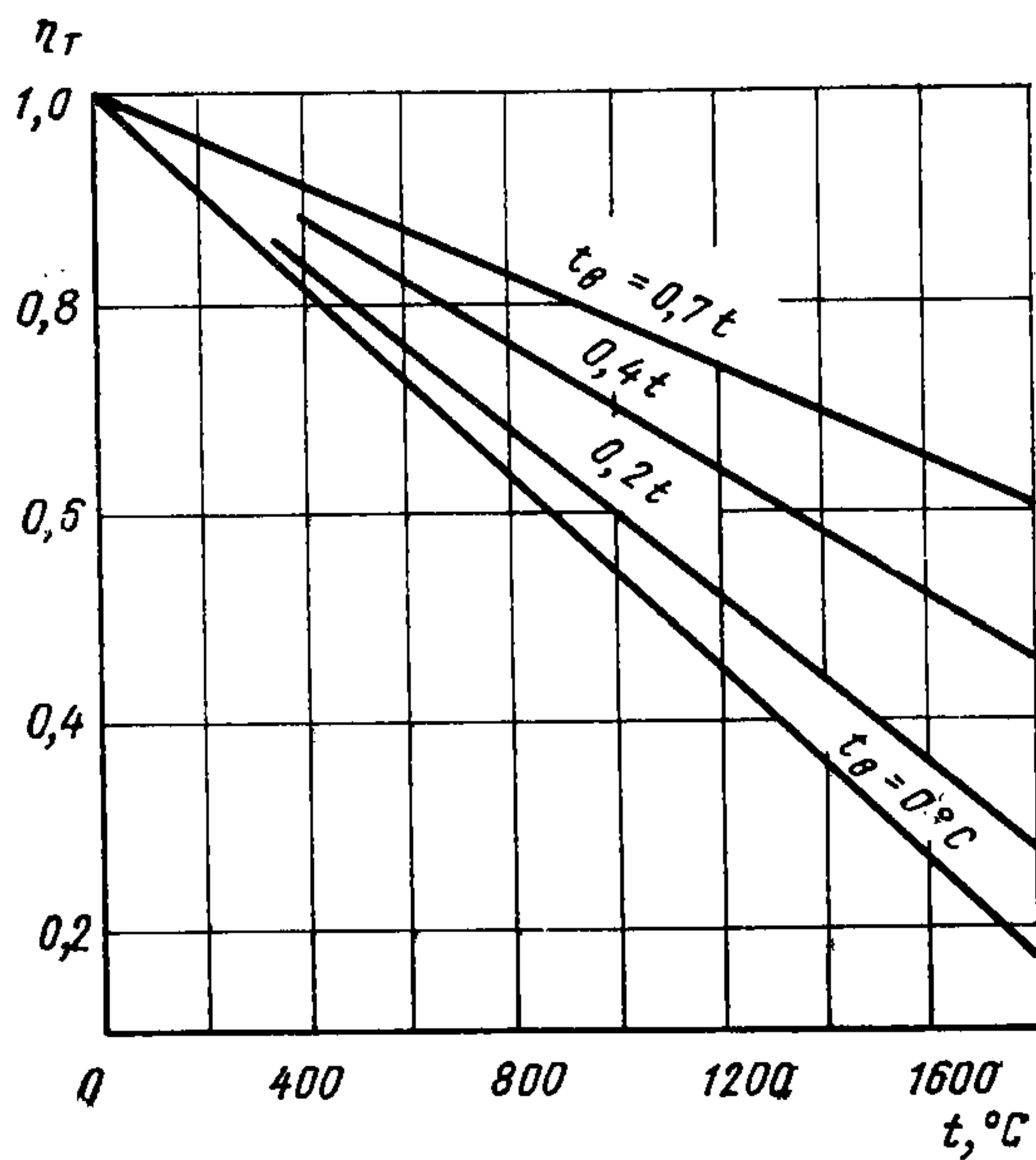


Рис. 72. Коэффициент использования тепла  $\eta_T$  метана

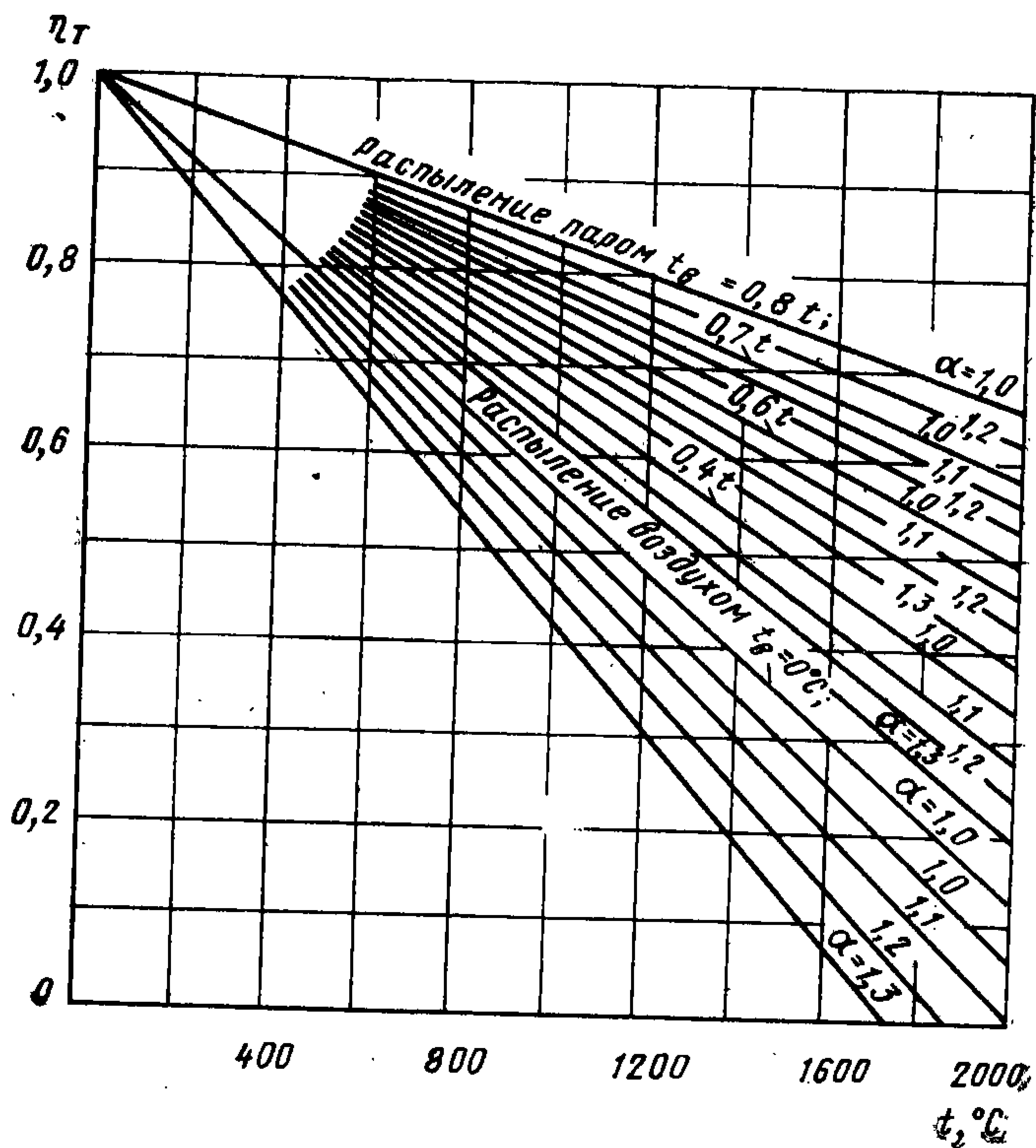


Рис. 73. Коэффициент использования тепла  $\eta_T$  мазута; для нефти  $Q_H = 43815 \text{ кДж/м}^3$

# РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ

## МЕХАНИКА ГАЗОВ

### Условные обозначения

- $\alpha$  — коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{ч}$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $L^2T^{-1}$ ;  
 $B, B$  — барометрическое давление,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ;  $L^{-1}MT^{-2}$ ;  
 $B_1, b$  — характеристики струи;  
 $a, b, l, s$  — линейный размер,  $\text{м}$ ;  $L$ ;  
 $c_{\text{ср}}$  — средняя теплоемкость в интервале от 0 до  $t^\circ\text{C}$ ;  $\text{кДж}/(\text{кг}^\circ\text{C})$ ;  $L^2T^{-2}\theta^{-1}$ ;  
 $c_p$  — теплоемкость при постоянном давлении,  $\text{кДж}/(\text{кг}^\circ\text{C})$ ;  $L^2T^{-2}\theta^{-1}$ ;  
 $c_v$  — теплоемкость при постоянном объеме,  $\text{кДж}/(\text{кг}^\circ\text{C})$ ;  $L^2T^{-2}\theta^{-1}$ ;  
 $c$  — истинная теплоемкость,  $\text{кДж}/(\text{кг}^\circ\text{C})$ ;  $L^2T^{-2}\theta^{-1}$ ;  
 $D, d$  — диаметр, линейный размер,  $\text{м}$ ;  $L$ ;  
 $d_{\text{экв}}, d_{\text{гидр}}$  — гидравлический (эквивалентный) диаметр,  $d_{\text{гидр}} = \frac{4F}{\pi} \text{ м}$ ;  $L$ ;  
 $E$  — кинетическая энергия секундного расхода,  $\text{Дж}/\text{с}$ ;  $\text{Вт}$ ;  $L^2MT^{-3}$ ;  
 $F, f$  — площадь поперечного сечения,  $\text{м}^2$ ;  $L^2$ ;  
 $G$  — масса,  $\text{кг}$ ;  $M$ ;  
 $g$  — расход по массе,  $\text{кг}/\text{с}$ ;  $MT^{-1}$ ;  
 $g$  — ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $LT^{-2}$ ;  
 $H$  — полное давление вентилятора,  $\text{Н}/\text{м}^2$ , обозначается также паскаль;  $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н}/\text{м}^2$ ;  $L^{-1}MT^{-2}$ ;  
 $H$  — напор столба жидкости, высота дымовой трубы, напор вентилятора,  $\text{м}$ ;  $\text{мм вод. ст.}$ ;  $L$ ;  
 $h_{\text{пот}}$  — потери давления,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ,  $L^{-1}MT^{-2}$ ; ( $\text{мм вод. ст.}$ ;  $L$ );  
 $h_{\text{тр}}$  — потери давления на трение,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ,  $L^{-1}MT^{-2}$ ; ( $\text{мм вод. ст.}$ ;  $L$ );  
 $h_{\text{м.с}}$  — потери давления на местные сопротивления,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ,  $L^{-1}MT^{-2}$ ; ( $\text{мм вод. ст.}$ ;  $L$ );  
 $\Sigma h$  — суммарные потери давления,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ,  $L^{-1}MT^{-2}$ ; ( $\text{мм вод. ст.}$ ;  $L$ );  
 $h$  — давление;  $h_{\text{дин}}$ ,  $h_{\text{ст}}$ ,  $h_{\text{геом}}$  — динамическое (скоростное), статическое, геометрическое давление,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ,  $L^{-1}MT^{-2}$ ; ( $\text{мм вод. ст.}$ ;  $L$ );  
 $i$  — удельная энтальпия (теплосодержание),  $\text{кДж}/\text{кг}$ ,  $\text{кДж}/\text{м}^3$ ;  $L^2T^{-2}$ ;  $L^{-1}MT^{-2}$ ;  
 $I$  — количество движения секундного расхода,  $\text{Н}$ ;  $LMT^{-2}$ ;  
 $k = \frac{c_p}{c_v}$  — показатель адиабаты;  
 $k_1, k_2, k_3$  — коэффициенты усреднения скорости при определении соответственно: расхода, количества движения, кинетической энергии;  
 $L, l$  — длина, линейный размер,  $\text{м}$ ;  $L$ ;

- $M$  — молекулярная масса, кг/моль;  $M$ ;  
 $n$  — число оборотов, об/мин;  $T^{-1}$ ;  
 $P$  — давление, Н/м<sup>2</sup>,  $L^{-1}MT^{-2}$ ; (мм вод. ст.;  $L$ );  
 $P$  — периметр, м;  $L$ ;  
 $q$  — тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>;  $MT^{-3}$ ;  
 $R, R_{\text{о.ф.ш}}$  — универсальная газовая постоянная по кислородной физической шкале,  $(8316,96 \pm 0,34)$  Дж/(кмоль·°C);  $L^2T^{-2}\theta^{-1}$ ;  
 $r, R$  — радиус, м;  $L$ ;  
 $r$  — теплота парообразования, кДж/кг;  $L^2T^{-2}$ ;  
 $r'$  — теплота плавления, кДж/кг;  $L^2T^{-2}$ ;  
 $Re$  — критерий Рейнольдса;  
 $T$  — температура по абсолютной шкале (Кельвина), К;  $\theta$ ;  
 $t$  — температура по столбчатой шкале, °C;  $\theta$ ;  
 $U$  — коэффициент инжекции;  
 $u$  — окружная скорость, м/с;  $LT^{-1}$ ;  
 $V$  — объем, м<sup>3</sup>;  $L^3$ ;  
 $v = \frac{1}{\rho}$  — удельный объем, м<sup>3</sup>/кг;  $L^3M^{-1}$ ;  
 $V$  — расход газа, производительность, м<sup>3</sup>/ч, м<sup>3</sup>/с;  $L^3T^{-1}$ ;  
 $w$  — скорость, м/с;  $LT^{-1}$ ;  
 $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $MT^{-3}\theta^{-1}$ ;  
 $\alpha$  — коэффициент скорости;  
 $\beta$  — коэффициент объемного расширения газа, 1/°C;  $\theta^{-1}$ ;  
 $\delta$  — средняя высота выступов поверхности, мм;  $L$ ;  
 $\zeta$  — коэффициент гидравлического сопротивления;  
 $\eta$  — коэффициент вязкости, Н·с/м<sup>2</sup>;  $L^{-1}MT^{-1}$ ;  
 $\eta$  — коэффициент полезного действия, к. п. д.;  
 $\lambda$  — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C);  $LMT^{-3}\theta^{-1}$ ;  
 $\mu$  — коэффициент трения;  
 $\mu = \Phi \cdot \alpha$  — коэффициент расхода;  
 $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/ч; м<sup>2</sup>/с;  $L^2T^{-1}$ ;  
 $\rho$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $L^{-3}M$ ;  
 $\rho_{\text{нас}}$  — насыпная масса, плотность вещества с учетом пустот, в естественном виде, кг/м<sup>3</sup>;  $L^{-3}M$ ;  
 $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения, Дж/м<sup>2</sup>;  $MT^{-2}$ ;  
 $\tau$  — время, ч, с;  $T$ ;  
 $\Phi, \Psi$  — коэффициент сжатия струи.

## Индексы

- 'и' — при рассмотрении газожидкостной системы относятся соответственно к паровой и жидкой фазе;  
 0 — означает (если нет оговорок), что параметр относится к приведенным (нормальным) условиям:  $P = 101\,325$  Н/м<sup>2</sup> (760 мм рт. ст.);  $t = 0^\circ\text{C}$ ;  
 $t$  — означает, что параметр рассматривается при действительной температуре.

Примечание. В настоящее время в соответствии с системой СИ введена новая единица для измерения давлений — паскаль. 1 Па = 1 Н/м<sup>2</sup>. 1 мм вод. ст. = 9,80665 Н/м<sup>2</sup> = 9,8065 Па. 1 мм вод. ст.  $\approx$  10 Па или 1 мм вод. ст. = 1 да Па с ошибкой менее 2%.

## ДАВЛЕНИЯ И НАПОРЫ

### ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ

Одним из основных уравнений механики жидкости и газа является уравнение Бернулли. Для идеальной жидкости с постоянной плотностью оно записывается в виде

$$\frac{\rho w^2}{2} + P + \rho g z = \text{const } \text{Н/м}^2.$$

В этом уравнении каждое слагаемое имеет размерность энергии, отнесенной к единице объема  $[(\text{Н} \cdot \text{м})/\text{м}^3 = \text{Дж}/\text{м}^3 \text{ или } \text{Н/м}^2]$ . Такую единичную энергию именуют удельной энергией или напором и обозначают через  $h$  или  $H$ . Если энергию жидкости относить к единице силы тяжести, то уравнение Бернулли запишется

$$\frac{w^2}{2g} + \frac{P}{\rho g} + z = \text{const } \text{м}.$$

В этом случае, каждое слагаемое имеет размерность  $\text{Дж}/\text{Н} = \text{м}$ .

Таким образом в системе СИ напор может измеряться либо в единицах длины (м), либо в единицах давления ( $\text{Н/м}^2$ ). В порядке исключения разрешается применение внесистемных единиц: мм вод. ст. и мм рт. ст.

По физическому смыслу первое слагаемое в уравнении Бернулли представляет собой кинетическую энергию, которой обладает движущаяся жидкость в рассматриваемом сечении потока; второе — запас потенциальной энергии, обусловленный абсолютным давлением в данном сечении; третье — потенциальная энергия положения частицы относительно плоскости сравнения.

Величину  $w^2/2g$  именуют скоростным (динамическим) напором,  $P/\rho g$  — пьезометрическим напором и  $z$  — геометрическим напором. Напоры могут быть выражены и в единицах давления.

Сумму геометрического и пьезометрического напоров называют статическим напором

$$h_{\text{ст}} = h_{\text{геом}} + h_{\text{пье}} = z + P/\rho g.$$

Сумму статического и скоростного напоров именуют полным или гидродинамическим напором

$$h = h_{\text{ст}} + h_{\text{ск}}.$$

Перешедшую в тепло энергию («потерянную») обозначают через  $h_{\text{пот.}}$ .

При установившемся движении реального газа сумма всех напоров (давлений) изотермически движущейся несжимаемой жидкости есть величина постоянная в любом поперечном сечении канала:

$$h_{\text{ск}} + h_{\text{пье}} + h_{\text{геом}} + h_{\text{пот}} = \text{const}.$$

Давление различают абсолютное  $P_a$  и избыточное (над атмосферным)  $P_{\text{и}}$ . Избыточное давление может быть положительным или отрицательным (разрежение). Давление измеряется в ньютонах на

квадратный метр — Н/м<sup>2</sup> = Па — паскаль. В порядке исключения допускается применение внесистемной единицы — мм вод. ст.

**Закон Паскаля.** Внешнее давление, действующее на некоторый объем жидкости в каком-нибудь одном направлении, распределено равномерно по всему объему, занимаемому жидкостью (газом), и направлено перпендикулярно любой плоскости, ограничивающей объем жидкости.

**Закон Гей-Люссака.** При постоянном давлении объем газа прямо пропорционален, а его объемная масса обратно пропорциональна абсолютной температуре:

$$V_t = V_0 (1 + \beta t) = V_0 \frac{T}{273}; \quad V_{t_2} = V_{t_1} \frac{T_2}{T_1};$$

$$\beta = \frac{1}{273} = 0,00367;$$

$$\rho_t = \frac{\rho_0}{(1 + \beta t)} = \rho_0 \frac{273}{T}; \quad \rho_{t_2} = \rho_{t_1} \frac{T_1}{T_2};$$

$$w_t = w_0 (1 + \beta t) = w_0 \frac{T}{273}; \quad w_{t_2} = w_{t_1} \frac{T_2}{T_1}.$$

**Закон Бойля—Мариотта.** При постоянной температуре газа произведение удельного объема на давление есть величина постоянная:

$$P v = \text{const}; \quad v = v_0 \frac{P_0}{P}.$$

**Уравнение Менделеева—Клапейрона** характеризует состояние газа и устанавливает зависимость объема от температуры и давления:

$$P v = R T,$$

где  $R$  — газовая постоянная.

$$v_2 = v_1 \frac{P_1 T_2}{P_2 T_1}; \quad \rho_2 = \rho_1 \frac{P_2 T_1}{P_1 T_2}.$$

**Теорема Эйлера**, или теорема импульсов, гласит, что разность количеств движения газа, вытекающего из контура и втекающего в него, спроектированная на любую ось, равна сумме всех сил, действующих на газ, заключенный в данном контуре, спроектированных на ту же ось:

$$\frac{d}{d\tau} (\Sigma m w) = \Sigma P.$$

**Уравнение неразрывности (сплошности)** движения при установившемся течении имеет вид:

$$w_1 F_1 \rho_1 = w_2 F_2 \rho_2 \quad \text{при} \quad \rho_1 = \rho_2; \quad w_1 F_1 = w_2 F_2; \quad w = V/F.$$

**Движение жидкости** в каналах характеризуется критерием Рейнольдса:

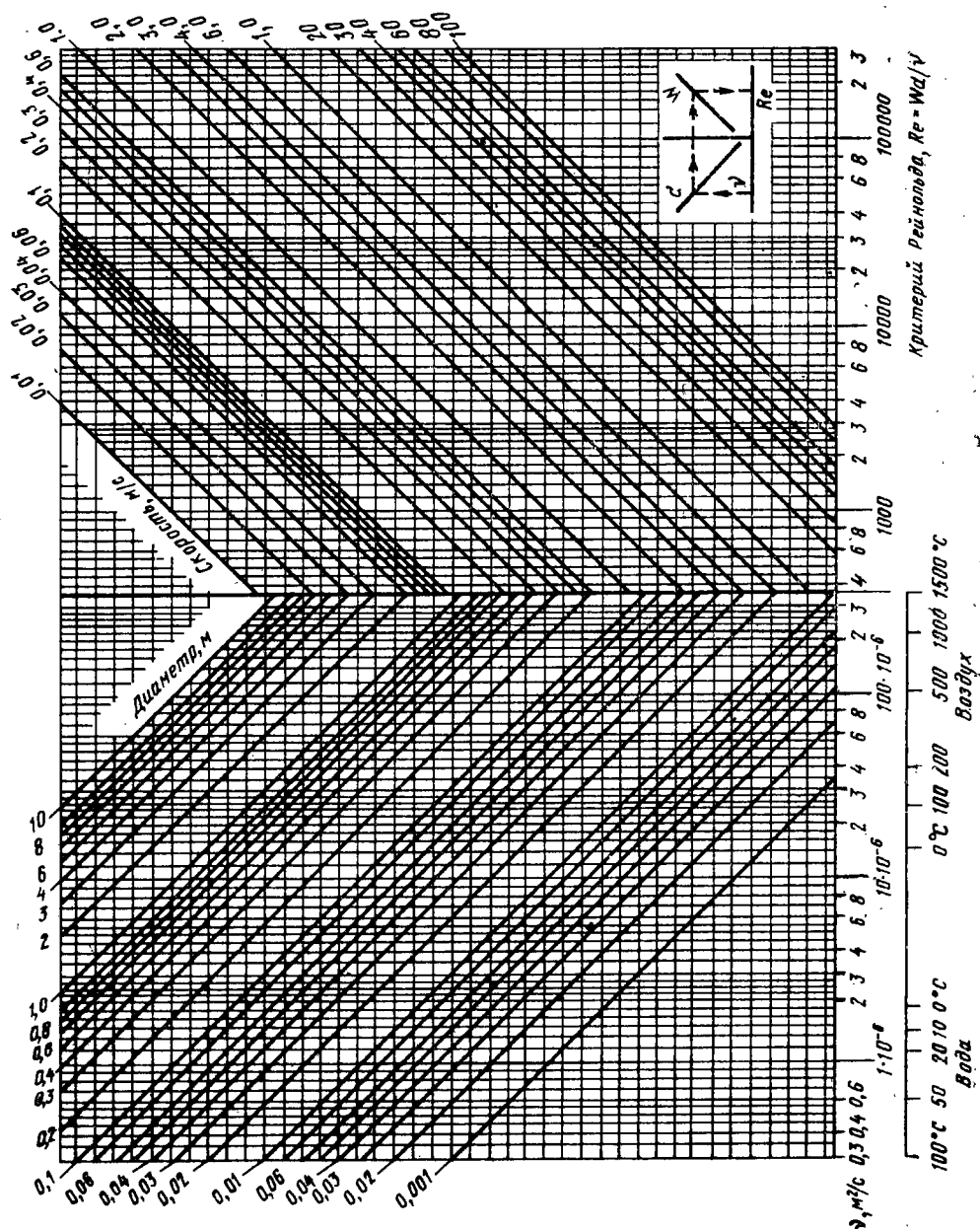
$$Re = \frac{w d}{\nu} = \frac{w d \rho}{\eta}.$$

При значении  $Re < 2320$  наблюдается ламинарный режим движения и при  $Re > 2320$  — турбулентный. Профиль распределения скоростей по сечению трубопровода описывается уравнением параболы.

Отношение средней скорости (по расходу) к максимальной именуется коэффициентом усреднения скорости при определении расхода  $w_{\text{ср}}/w_{\text{max}} = k_0$ .

Рис. 74. Номограмма для определения критерия Рейнольдса:

$$Re = \frac{w d \rho}{\eta} = \frac{w d \rho}{\gamma}$$



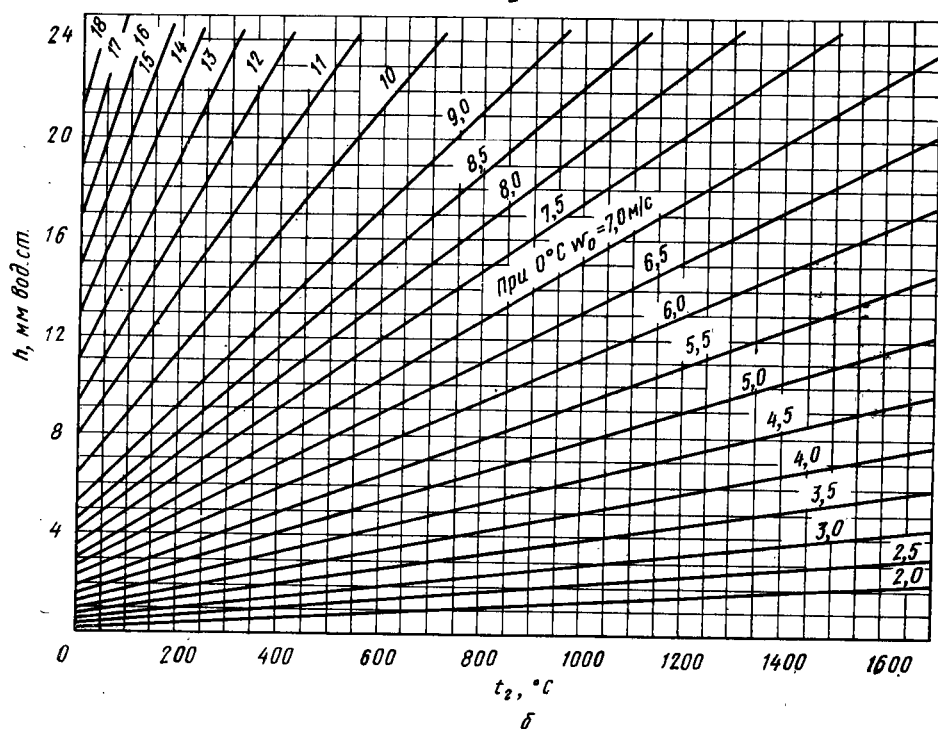
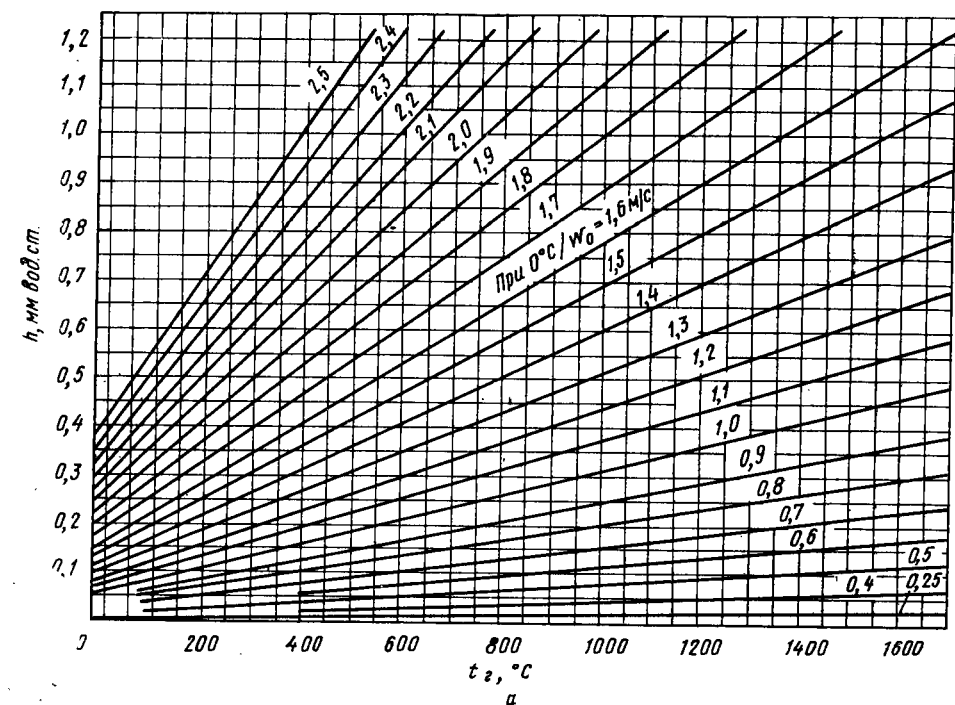


Рис. 75. Величина скоростного давления  $h_{\text{дин}}$  при  $\rho = 1,29 \text{ кг/м}^3$  и скорости газа  $w_0$ , м/с:  
 а — 0,25—2,5; б — 2,0—18,0

## ПОТЕРИ ДАВЛЕНИЯ

При движении жидкостей и газов по трубам и каналам происходит переход кинетической энергии потока в тепло — потеря давления  $h_{\text{пот}}$ . Различают потери давления двух видов: общие или потери давления на трение  $h_{\text{тр}}$  и потери давления на местные сопротивления  $h_{\text{м.с.}}$ . Измеряют потери давления в ньютонах на 1 метр квадратный или в миллиметрах водяного столба и они зависят от динамического давления — кинетической энергии движущегося потока газа или жидкости. Потери давления прямо пропорциональны динамическому (скоростному) давлению:

$$h_{\text{пот}} = \zeta h_{\text{дин}},$$

где  $\zeta$  — коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом гидравлического сопротивления и по физическому смыслу представляющий собой количество динамических давлений, теряемых на том или ином гидравлическом сопротивлении.

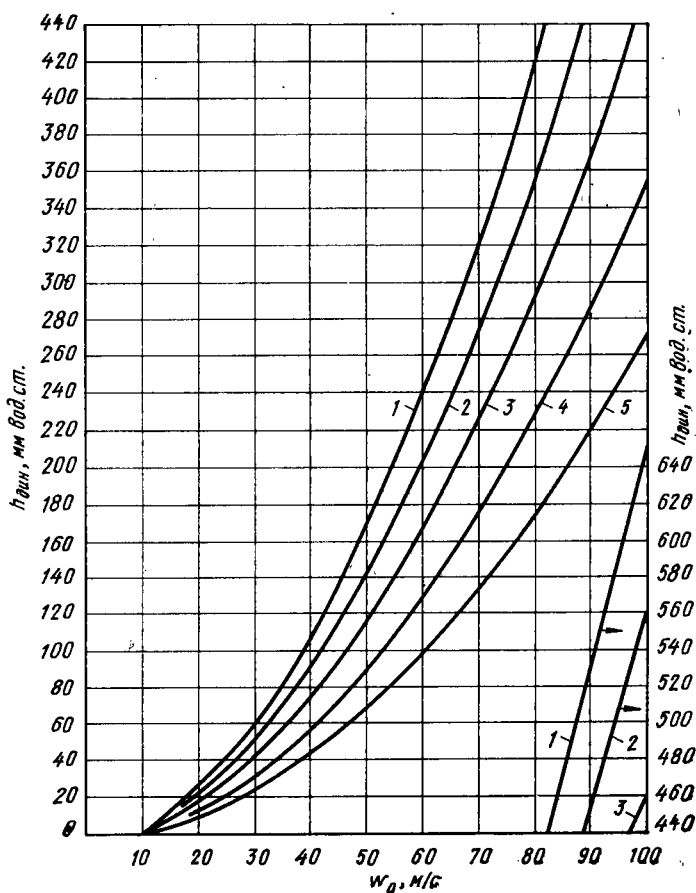


Рис. 76. Скоростное давление  $h_{\text{дин}}$  при различных скоростях  $w_0$  движения и плотности потока газов:

1 — воздух ( $\rho = 1,29 \text{ кг/м}^3$ ) и доменный газ; 2 — генераторный газ ( $\rho = 1,1 \text{ кг/м}^3$ ); 3 — смешанный газ ( $\rho = 0,9 \text{ кг/м}^3$ ,  $Q_H = 10680 \text{ кДж/м}^3$ ); 4 — смешанный газ ( $\rho = 0,7 \text{ кг/м}^3$ ,  $Q_H = 14030 \text{ кДж/м}^3$ ); 5 — коксовый газ ( $\rho = 0,53 \text{ кг/м}^3$ )

## ПОТЕРИ НА ТРЕНИЕ

При нахождении потерь на трение  $h_{тр}$  коэффициент гидравлического сопротивления  $\zeta_{тр}$  определяется как произведение коэффициента трения  $\mu$  на длину канала в калибрах  $\frac{L}{d_0}$ :

$$\zeta_{тр} = \mu \frac{L}{d_0}.$$

### Коэффициент трения при ламинарном режиме ( $Re \leq 2300$ )

Коэффициент трения  $\mu$  определяется по приведенным ниже графикам и формулам для соответствующей формы канала:

- а) круглое сечение  $\mu = 64/Re$  (рис. 77);
- б) прямоугольное сечение (отношение сторон  $a/b = 0 \div 1,0$ )  $\mu_{пр} = \varphi_1 \mu$  (рис. 78);
- в) кольцевое сечение  $\mu_{кол} = \varphi_2 \mu$  (рис. 78).

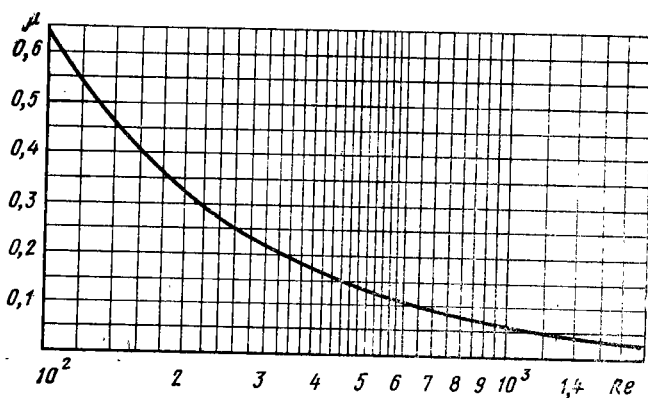


Рис. 77. Коэффициент трения  $\mu$  при ламинарном режиме:

|                 |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $Re$ . . . . .  | 100   | 200   | 300   | 400   | 500   | 600   | 700   |
| $\mu$ . . . . . | 0,640 | 0,321 | 0,214 | 0,160 | 0,128 | 0,107 | 0,092 |
| $Re$ . . . . .  | 800   | 900   | 1000  | 1100  | 1200  | 1300  |       |
| $\mu$ . . . . . | 0,080 | 0,071 | 0,064 | 0,058 | 0,053 | 0,049 |       |
| $Re$ . . . . .  | 1400  | 1500  | 1600  | 1700  | 1800  | 1900  | 2000  |
| $\mu$ . . . . . | 0,046 | 0,042 | 0,040 | 0,038 | 0,036 | 0,034 | 0,032 |

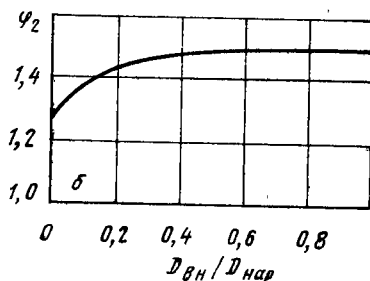
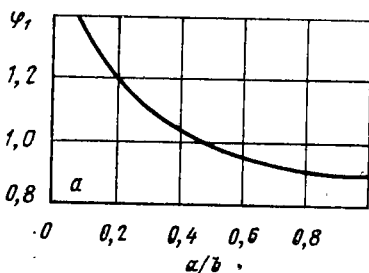


Рис. 78. Поправочные коэффициенты для определения коэффициентов трения в трубах прямоугольного (а) и кольцевого (б) сечений

## Коэффициент трения при турбулентном режиме

Для труб с шероховатыми стенками коэффициент трения  $\mu$  находят по приведенным ниже формулам и графикам. Среднюю высоту выступов шероховатости  $\delta$  определяют по данным, приведенным ниже:

а) круглое сечение канала  $\mu = \frac{1}{\left(2 \log 3,7 \frac{D_{\text{вн}}}{\delta}\right)^2}$ ;  
 $\varepsilon = \frac{\delta}{D_{\text{вн}}}$ ; (рис. 79);

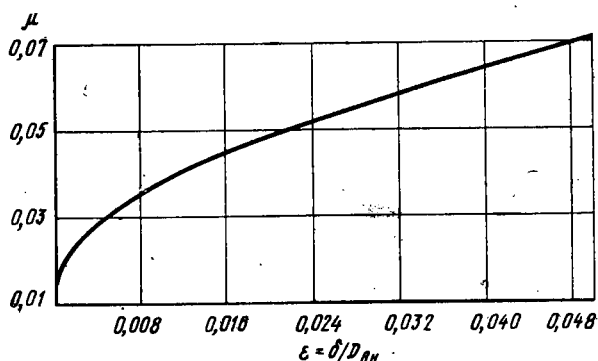


Рис. 79. Коэффициент трения  $\mu$  при турбулентном режиме

- б) прямоугольное сечение при отношении сторон  $a/b = 0,7 \div 1,0$ ;  
 $\mu_{\text{пр}} = \varphi_3 \mu$  (рис. 80);  
 в) кольцевое сечение  $\mu_{\text{кол}} = \varphi_4 \mu$  (см. рис. 80).

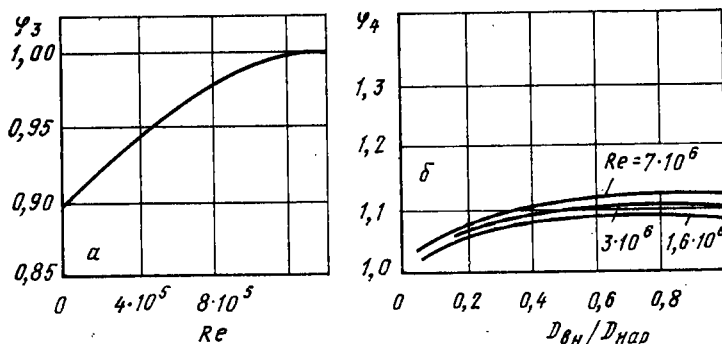


Рис. 80. Поправочные коэффициенты для определения коэффициента трения в трубе прямоугольного (а) и кольцевого (б) сечений

Таблица IX-1

### Шероховатость (неравномерная) $\delta$ стенок металлических труб

| Характер поверхности                                                      | $\delta$ , мм | Характер поверхности                                                   | $\delta$ , мм |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------|------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Чистые цельнотянутые трубы из латуни, меди и оцинка . . . . .             | 0,0015—0,0    | Стальные трубы после одного года эксплуатации на газопроводе . . . . . | 0,12          |
| Новые тщательно уложенные бесшовные стальные трубы . . . . .              | 0,04—0,17     | Стальные трубы, уложенные в обычных условиях . . . . .                 | 0,19          |
| Цельнотянутые стальные и железные трубы после нескольких лет эксплуатации | 0,19          | Обычные оцинкованные железные трубы . . . . .                          | 0,39          |
|                                                                           |               | Обычные новые чугунные трубы . . . . .                                 | 0,25÷0,42     |

| Характер поверхности                                                              | $\delta$ , мм | Характер поверхности                                                   | $\delta$ , мм |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------|------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Асфальтированные стальные трубы . . . . .                                         | 0,12—0,21     | Менее аккуратно уложенные новые или очищенные чугунные трубы . . . . . | 0,45          |
| Чисто оцинкованные железные трубы . . . . .                                       | 0,25          | Грубо оцинкованные железные трубы . . . . .                            | 0,50          |
| Новые чугунные трубы с за-<br>литыми и хорошо загла-<br>женными стыками . . . . . | 0,31          | Старые заржавленные железные трубы . . . . .                           | 0,60          |
| Трубы из листового железа<br>и хорошо заглаженные це-<br>ментные трубы . . . . .  | 0,33          | Сильно заржавленные железные трубы . . . . .                           | 0,67          |
|                                                                                   |               | Загрязненные металлические<br>трубы . . . . .                          | 0,75÷0,90     |

Таблица IX-2

**Шероховатость (неравномерная)  $\delta$  стенок труб,  
изготовленных из различных материалов (неметаллических)**

| Характер поверхности                                                               | $\delta$ , мм | Характер поверхности                                            | $\delta$ , мм |
|------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------------|---------------|
| Чистые трубы из стекла . . . . .                                                   | 0,0015÷0,01   | Поверхность из чистого це-<br>мента . . . . .                   | 0,25÷1,25     |
| Резиновый шланг . . . . .                                                          | 0,01÷0,03     | Кирпич, покрытый глазурью . . . . .                             | 0,45÷3,0      |
| Прорезиненный изнутри бре-<br>зент хорошо натянутой тру-<br>бы . . . . .           | 0,02÷0,05     | Штукатурка цементным рас-<br>твором . . . . .                   | 0,45÷3,0      |
| Очень шероховатый проре-<br>зиненный изнутри хлопчато-<br>бумажный шланг . . . . . | 0,20÷0,30     | Кирпичная кладка на цемент-<br>ном растворе . . . . .           | 0,80÷6,0      |
| Хороший кожаный шланг . . . . .                                                    | 0,15          | Бетонированные каналы . . . . .                                 | 0,80÷9,0      |
| Обычный непрорезиненный<br>льняной или пенковый<br>шланг . . . . .                 | 0,50÷0,80     | Облицовка из тесаного камня . . . . .                           | 1,25÷6,0      |
| Березовая фанера (продольная) . . . . .                                            | 0,025÷0,05    | Обычная бутовая кладка на<br>цементе . . . . .                  | 6,0÷17,0      |
| Сосновая фанера (продольная) . . . . .                                             | 0,10          | Деревянные лотки из строга-<br>ных досок . . . . .              | 0,25—2,0      |
| Деревянные трубы . . . . .                                                         | 0,25÷1,25     | Деревянные лотки из нестро-<br>ганных досок . . . . .           | 0,45÷3,0      |
| Керамические дренажные<br>трубы . . . . .                                          | 0,45÷6,0      | Деревянные лотки из досок<br>с наколаченными планками . . . . . | 0,80÷4,0      |
| Покрытые глазурью канали-<br>зационные трубы . . . . .                             | 0,25÷6,0      |                                                                 |               |

## ПОТЕРИ НА МЕСТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Падение давления на местном сопротивлении находят по формуле  $h_{м.с} = \zeta_{м.с} \cdot h_{дин}$ . Местные сопротивления связаны с изменениями сечения или формы канала. Коэффициент местного сопротивления определяется геометрией данного участка тракта и практически не зависит от числа  $Re$ , так как в случаях расчета печных систем приходится иметь дело с турбулентным режимом движения в области автомодельности.

При нахождении потерь на местные сопротивления ( $h_{м.с}$ ) коэффициенты гидравлического (местного) сопротивления  $\zeta_{м.с}$  определяют по приведенным ниже таблицам и графикам для соответствующего случая. В целях упрощения в дальнейшем опущены индексы «м.с» при коэффициенте местного сопротивления  $\zeta_{м.с}$  и поставлены индексы, показывающие, к какой скорости он относится.

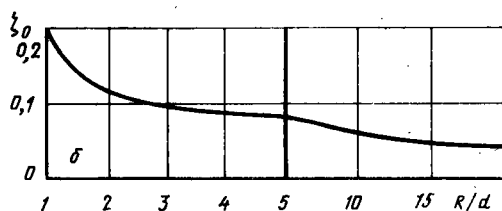
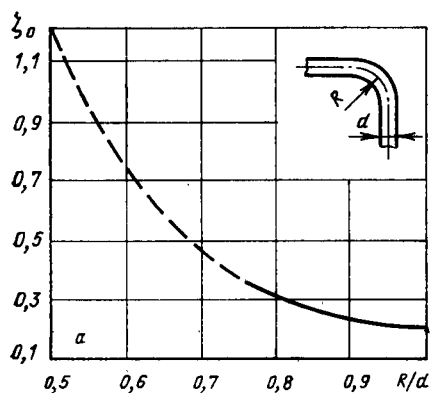


Рис. 81. Исходный коэффициент сопротивления плавных поворотов  $\zeta_0 = f(R/d)$ . Верхний рисунок для малых значений  $R/d$

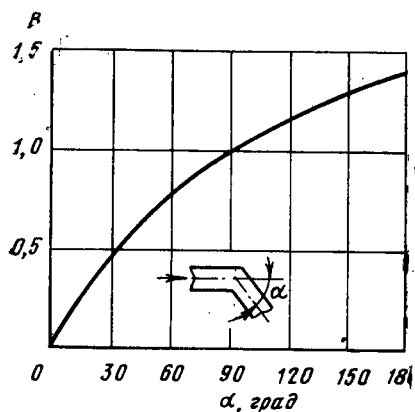


Рис. 82. Поправочный коэффициент  $B$  к коэффициенту сопротивления поворотов, зависящих от угла  $\alpha$  поворота

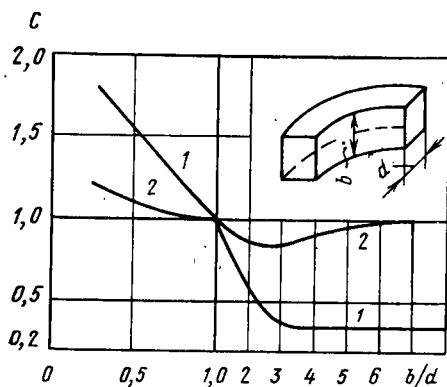


Рис. 83. Поправочный коэффициент  $C$  к коэффициенту сопротивления плавных поворотов, зависящих от формы сечения при  $b/d$ : 1 — 3—4; 2 —  $< 1,5$

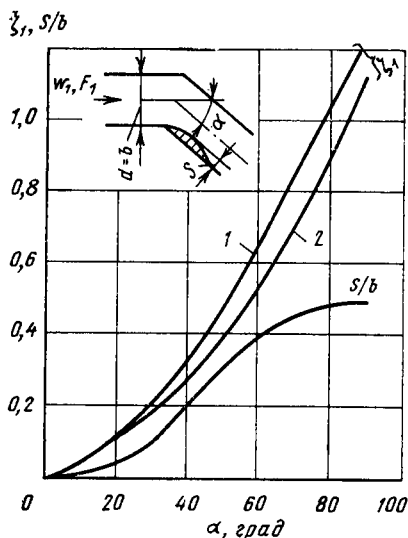


Рис. 84. Зависимость относительной ширины  $s/b$  вихревой зоны и коэффициента сопротивления  $\zeta_1$  колен от угла поворота  $\alpha$ ; 1 — шероховатое колено; 2 — гладкое колено

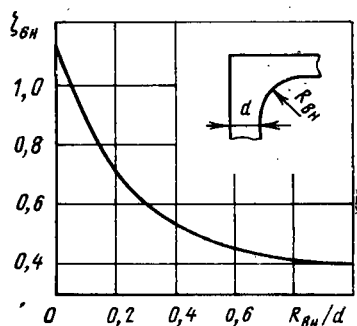


Рис. 85. Исходный коэффициент сопротивления резких поворотов с закругленной внутренней кромкой; при  $R_{вн}/d > 1$   $\zeta_{вн} = 0,39$

## 1. Изменение направления потока

При выполнении канала с обеими закругленными кромками — внутренней и наружной ( $R_{вн} \neq 0$ ;  $R_n > R_{вн}$ ) — поворот именуется плавным. Для плавного поворота коэффициент местного сопротивления определяют по формуле  $\zeta = \zeta_0 \cdot B \cdot C$ . Сомножители правой части уравнения учитывают:  $\zeta_0$  — радиус кривизны  $R$  (рис. 81);  $B$  — угол поворота  $\alpha$  (рис. 82) и  $C$  — размеры поперечного сечения;  $b$  — размер изогнутой стороны канала,  $d$  — размер плоской стороны канала (рис. 83). При круглом или квадратном сечении  $C = 1,0$ .

Коэффициент местного сопротивления  $\zeta_1$  резкого поворота ( $R_{вн} = R_n = 0$ ), так называемого «колена», определяют по рис. 84. Для канала прямоугольного сечения  $\zeta = \zeta_1 \cdot C$ .

Коэффициент местного сопротивления резкого поворота с закругленной внутренней кромкой ( $R_{вн} > 0$ ;  $R_n = 0$ ) подсчитывают по формуле  $\zeta = \zeta_{вн} \cdot B$ , где  $\zeta_{вн}$  определяется по рис. 85 в зависимости от отношения  $R_{вн}/d$ , а  $B$  по графику рис. 82 в зависимости от угла поворота. Повороты с закруглением одной наружной кромки ( $R_{вн} = 0$ ;  $R_n > 0$ ) применять не следует, так как они имеют большее сопротивление, чем повороты без закруглений. Влияние закругления одной из кромок канала на коэффициент местного сопротивления показано на рис. 86.

Значение коэффициента сопротивления  $\zeta_1$  для спаренного колена показано на рис. 87, а, б. Для канала прямоугольного сечения  $\zeta = \zeta_1 \cdot C$ .

Для спаренных колен с углом  $\alpha = 90^\circ$  коэффициент местного сопротивления приведен на рис. 88. В случае прямоугольного сечения канала  $\zeta_1$  необходимо умножать на поправочный коэффициент  $C$  (см. рис. 83).

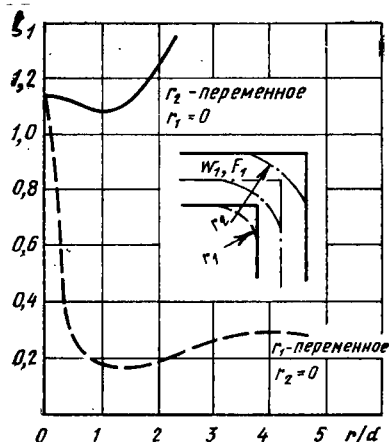


Рис. 86. Зависимость коэффициента сопротивления  $\zeta_1$  колена от относительного радиуса закругления  $r/d$  внутренней и внешней стенок

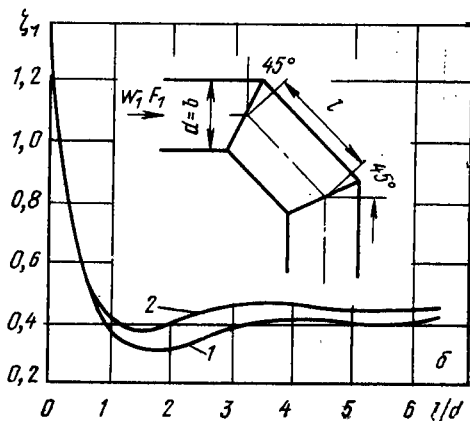
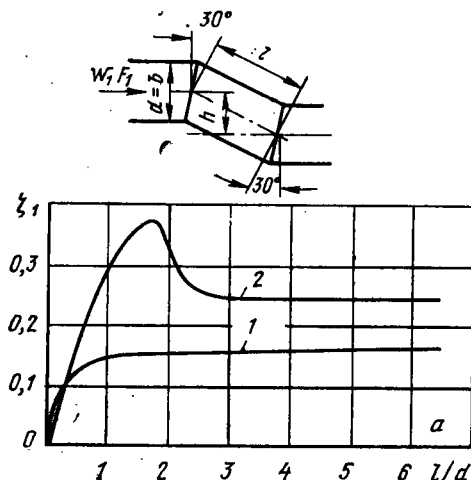


Рис. 87. Зависимость коэффициента сопротивления  $\zeta_1$  колена, составленного из двух колен до  $30^\circ$  (а) и по  $45^\circ$  (б), от относительного расстояния  $l/d$  при  $Re = 230000$ :  
1 — гладкое колено; 2 — шероховатое колено

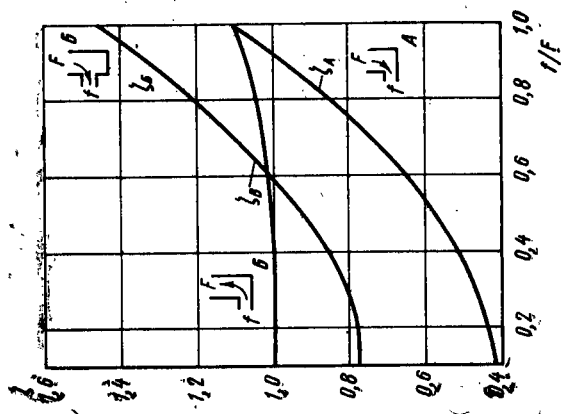


Рис. 89. Коэффициент сопротивления колена с изменением сечения

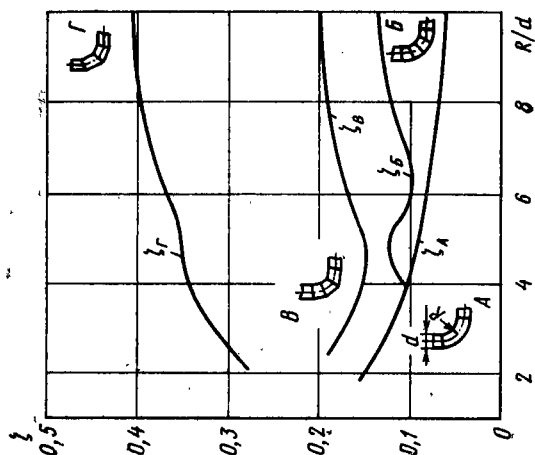


Рис. 90. Коэффициент местного сопротивления сегментного отвода

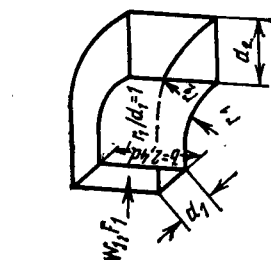


Рис. 91. Зависимость коэффициента сопротивления  $\zeta_1$  отвода от отношения сторон  $d_2/d_1$  при постоянном отношении  $r_1/d_1=1$  и при различных отношениях  $r_2/d_1$

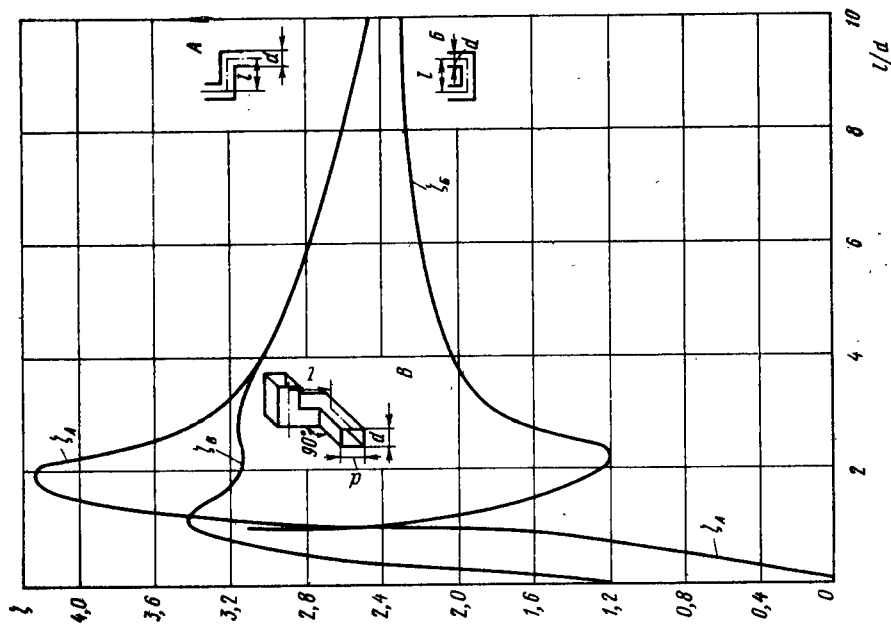
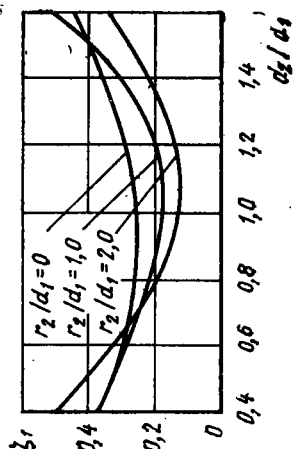


Рис. 88. Коэффициент сопротивления с спаренного колена

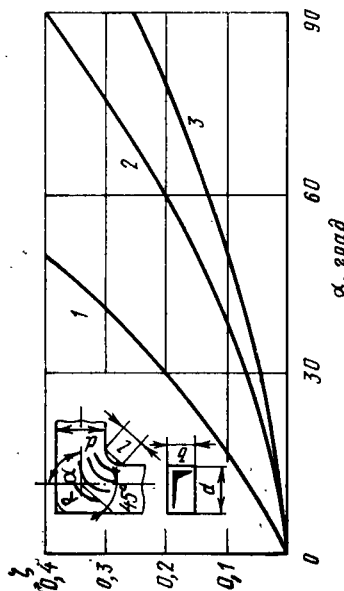


Рис. 93. Коэффициент сопротивления в колене с направляющими лопатками:  
1 — без лопаток; 2 —  $R/d = 0,1$ ; 3 —  $R/d = 0,25$

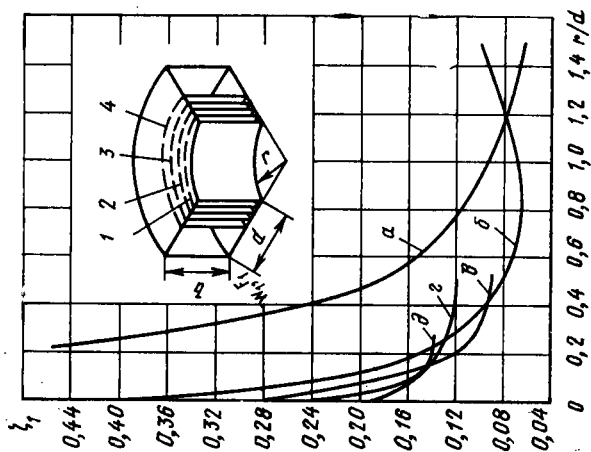


Рис. 92. Зависимость коэффициента сопротивления  $\zeta_1$  отвода с концентрическими лопатками и без них от относительного радиуса закругления  $r/d$ :  
а — без лопаток; б — одна лопатка; в — две лопатки; г — три лопатки; д — четыре лопатки; 1, 2, 3, 4 — соответственно лопатки первая, вторая, третья, четвертая

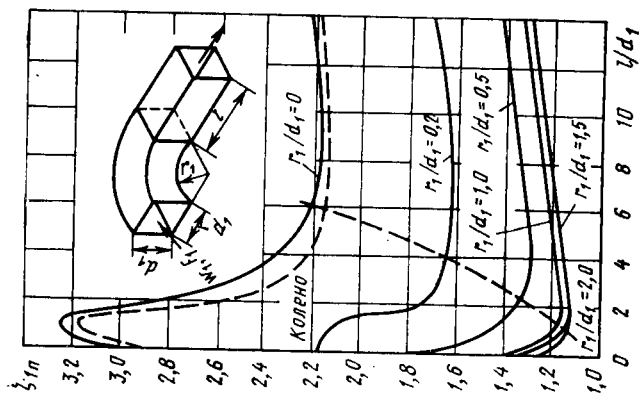


Рис. 95. Зависимость коэффициента полного сопротивления  $\zeta_1$  и отводов от относительной длины начального выходного участка  $l/d$  при различных значениях  $r_1/d_1$

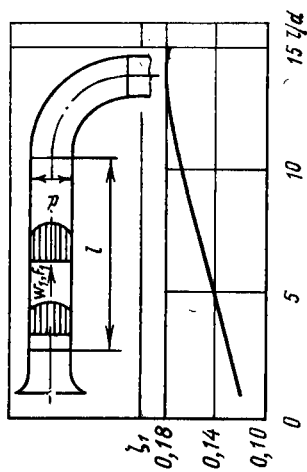


Рис. 94. Зависимость коэффициента сопротивления  $\zeta_1$  отвода от относительной длины начального (входного) участка  $l/d$

Для колена с изменением сечения и углом поворота  $\alpha=90^\circ$  значения  $\zeta_1$  приведены на рис. 89 и 91.

Для сегментного отвода значения  $\zeta_1$  приведены на рис. 90. Практически более четырех сегментов делать не рекомендуется.

Влияние направляющих лопаток на величину коэффициента местного сопротивления приведено на графиках рис. 92 и 93.

Зависимость коэффициента местного сопротивления отвода от относительной длины входного и выходного участков показана на рис. 94 и 95. Наименьшая относительная длина выходного участка, дающая величину коэффициента полного сопротивления, близкую к минимуму, выделена пунктирной линией, нанесенной на рис. 95.

Для обвода и «утки» коэффициент местного сопротивления приведен на рис. 96, а, б. При построении обвода пользуются зависимостями

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{l}{2h} \text{ и } R = \frac{l}{4 \cdot \sin \alpha},$$

при построении «утки»

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{l}{h} \text{ и } R = \frac{l}{2 \sin \alpha}.$$

При прямоугольном сечении канала  $\zeta_1$  необходимо умножать на поправочный коэффициент  $C$  (см. рис. 83).

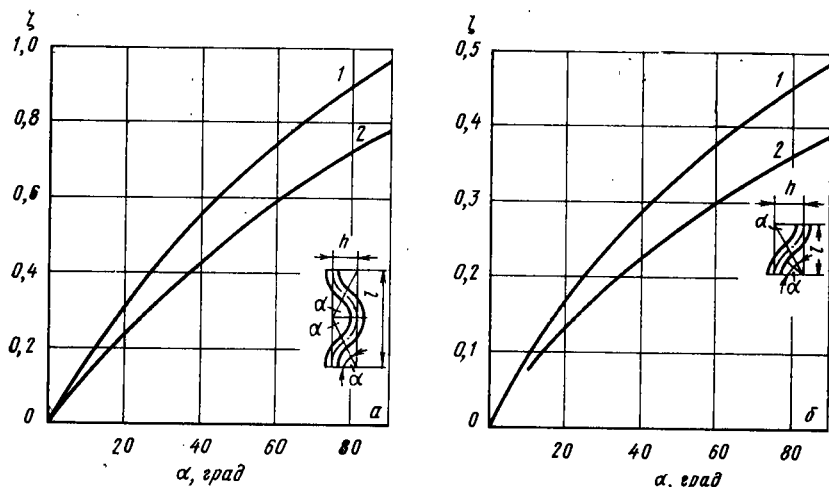


Рис. 96. Коэффициент местного сопротивления  $\zeta$  обвода (а) и «утки» (б) при  $R/d$ :  
1 — 1; 2 — 1,5

Для поворотов-конфузоров принимаются те же коэффициенты местного сопротивления, что и для соответствующих поворотов с равными сечениями, но относятся они к средней скорости, равной полусумме входной и выходной скоростей. При этом определяющие геометрические параметры поворотов  $\frac{R}{d}$ ;  $\frac{b}{d}$  и  $\frac{R_{\text{вн}}}{d}$  принимаются по входному сечению.

Расчет поворотов-диффузоров ведется по максимальной, т. е. по входной скорости, а коэффициенты местного сопротивления подсчитываются так же, как и для соответствующих поворотов с равными сечениями. При этом резкие повороты без закруглений и повороты с закруглением внутренней кромки при  $\frac{R_{\text{вн}}}{d} \leq 0,1$  дополнительных по-

правок из-за увеличения сечения не требуют. Для резких поворотов-диффузоров с закругленной внутренней кромкой при  $\frac{R_{вн}}{d} > 0,1$  коэффициент сопротивления подсчитывается по формуле

$$\zeta = \zeta_{вн} \cdot B \left( \frac{F}{f} \right)^2.$$

Для плавных поворотов-диффузоров коэффициент сопротивления подсчитывается по формуле

$$\zeta = \zeta_0 \cdot B \cdot C \left( \frac{F}{f} \right)^2;$$

определяющие геометрические параметры  $\left( \frac{R}{d}, \frac{b}{d}, \frac{R_{вн}}{d} \right)$  при расчете поворотов-диффузоров принимаются по входному сечению ( $B$  и  $C$ , см. рис. 82, 83).

Поворот в пучках труб. Сопротивление пучка труб рассчитывают независимо от наличия поворота, а коэффициент местного сопротивления поворота  $\zeta$  при повороте на  $180^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $45^\circ$  принимают равным соответственно 2; 1,0 и 0,65. Расчетная скорость потока определяется по живому сечению.

При изменении сечения газохода в начале и конце поворота в пучке местное сопротивление поворота рассчитывают по среднеарифметической из начальной и конечной скоростей потока с теми же значениями  $\zeta$ .

Поворот в пучке на  $180^\circ$  рассчитывают по среднеарифметическому значению из трех скоростей — в начале, середине и конце поворота.

## 2. Изменение скорости потока

При резком изменении сечения канала расчет коэффициента местного сопротивления выполняют по графикам: для расширения по рис. 97, а и для сужения по рис. 97, б. Графики пригодны для определения  $\zeta_1$  сужения и расширения любой формы и при длине расширения  $l > 8D$ . Коэффициент местного сопротивления  $\zeta_1$  относится

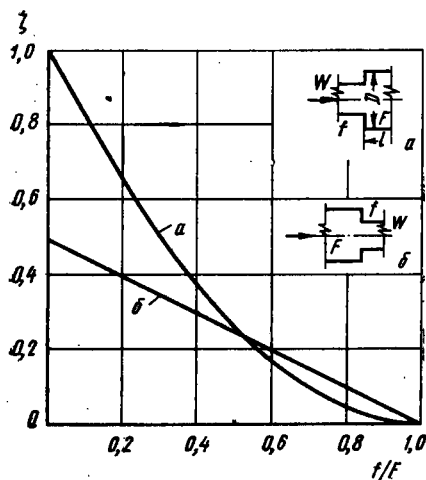


Рис. 97. Коэффициент сопротивления для внезапного расширения (а) и сужения (б)

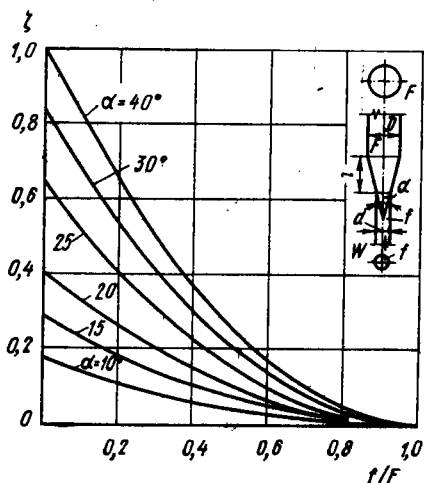


Рис. 98. Коэффициент сопротивления диффузора на вращенном потоке

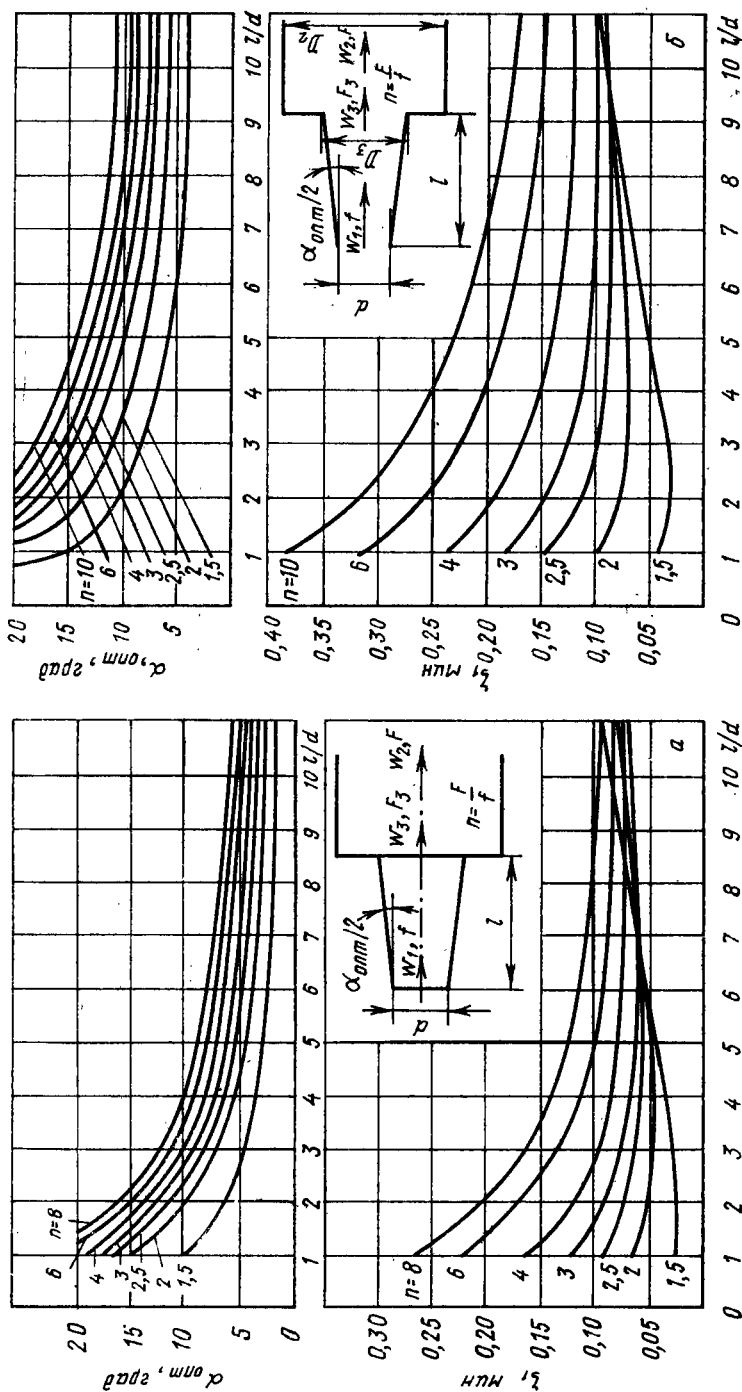


Рис. 99. Зависимость коэффициента минимального сопротивления  $\zeta_{\min}$  и оптимального угла расширения  $\alpha_{\text{opt}}$  от относительной длины  $l/d$ :  
а — ступенчатого диффузора круглого сечения; б — плоского ступенчатого диффузора

к скорости в меньшем сечении  $w_1$ ; его величина может быть также определена по формулам:

для сужения

$$\zeta_1 = 0,5 \left(1 - \frac{f}{F}\right)$$

и для расширения

$$\zeta = \left(1 - \frac{f}{F}\right)^2.$$

Коэффициент местного сопротивления для круглого диффузора в канале на выровненном потоке определяют по рис. 98.

При угле раствора диффузора  $\alpha > 40^\circ$  коэффициент сопротивления рассчитывают, как в случае внезапного расширения (для  $\alpha = 40^\circ$ ). Значения  $\zeta$  отнесены к скорости в меньшем сечении  $f$ . Для прямоугольного сечения и двустороннего раскрытия диффузора размер  $d$  принимается по диагонали сечения (максимальный угол раскрытия). При наличии за диффузором оборудования, создающего сопротивление, большее потерь в диффузоре, во всех случаях принимать для диффузора  $\zeta = 0$ .

Наименьшими потерями по сравнению с прямолинейным и криволинейным диффузорами отличается ступенчатый диффузор. Значения оптимальных углов расширения ступенчатого диффузора и соответствующие им минимальные значения коэффициентов общего сопротивления

$\zeta_{\min}$  для круглых и плоских диффузоров с различными отношениями площадей  $n = f/F$  приведены на графиках рис. 99, а, б в зависимости от относительных длин  $l/d$ .

Для конфузора значение коэффициента местного сопротивления  $\zeta$  может быть определено по формуле

$$\zeta = 0,5 \sin \frac{\alpha}{2} \left(1 - \frac{f}{F}\right)$$

либо по рис. 100. Значения  $\zeta$  отнесены к скорости в меньшем сечении  $f$ .

Коэффициент местного сопротивления для дросселирующих устройств приведен на рис. 101—105.

Для стержневых решеток, которые выполнены из удобообтекаемых, прямоугольных или круглых стержней, коэффициент местного сопротивления

Рис. 100. Коэффициент местного сопротивления  $\zeta$  конфузора

может быть представлен в виде зависимости от коэффициента живого сечения  $2\delta/b$ :

$$\zeta_1 = \beta \left( \frac{b}{2\delta} - 1 \right)^{1/2} = \beta \cdot K',$$

где  $\delta$  — полуширина просвета между соседними стержнями решетки;  
 $b$  — расстояние между осями соседних стержней решетки;  
 $\beta$  — опытный коэффициент, зависящий от формы решетки.  
 Значения  $\beta$  и  $K'$  приведены на рис. 106.

Коэффициент  $\beta$  мало зависит от относительной ширины стержня  $s_1/b$ , где  $s_1$  — ширина стержня. Для стержней, наклоненных под углом  $\varphi$  к потоку, коэффициент сопротивления определяют по формуле

$$\zeta_1 = \beta \left( \frac{b}{2\delta} - 1 \right)^{1/2} \sin \varphi.$$

Рис. 101. Зависимость коэффициента сопротивления  $\zeta_2$  диафрагмы или плоской решетки из перфорированного листа (а) или металлических полос (б) в трубе от отношения  $F_1/f$  ( $F_1$  — живое сечение решетки)

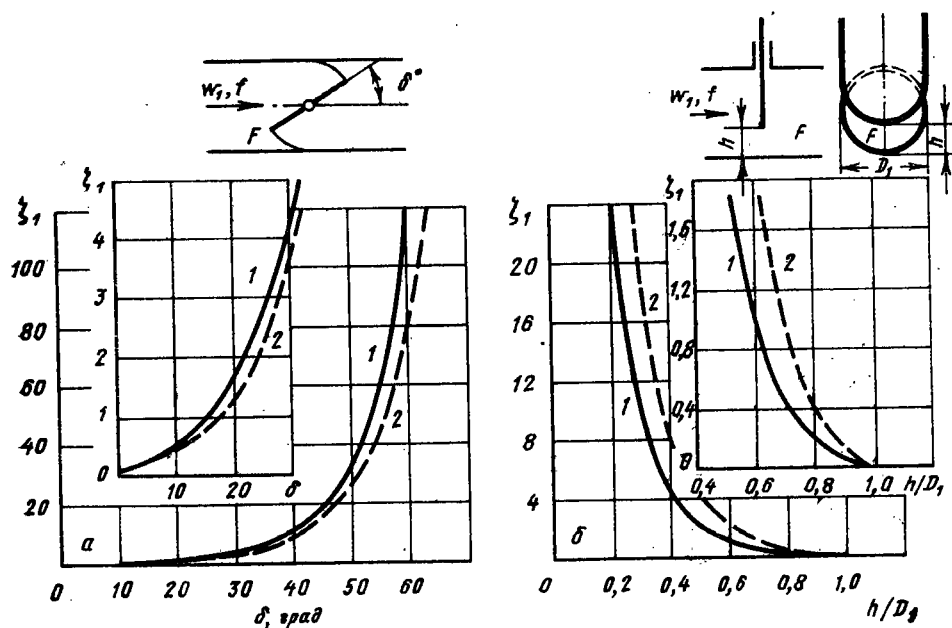
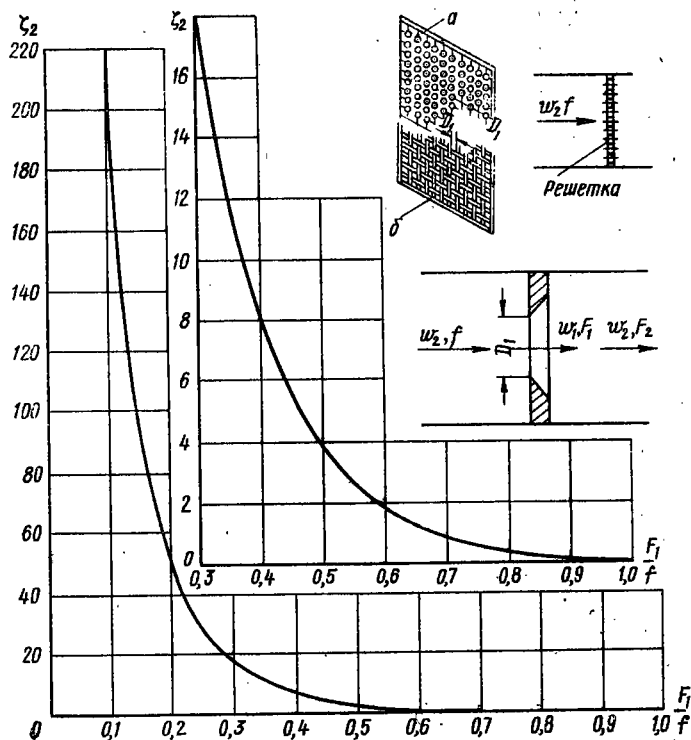


Рис. 102. Зависимость коэффициента сопротивления  $\zeta_1$  дроссель-клапана в трубах круглого и прямоугольного сечения от угла открытия клапана  $\delta$ , град (а) и от положения шибера  $h/D_1$  (б):

1 — круглое сечение; 2 — прямоугольное сечение

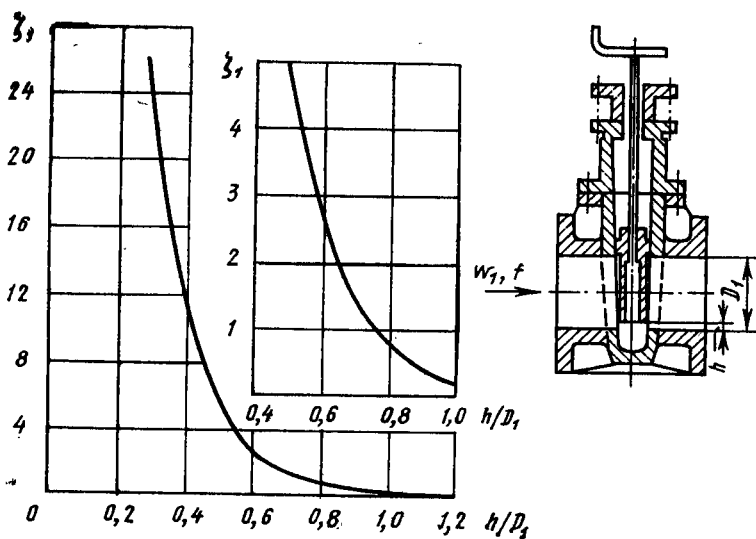


Рис. 103. Зависимость коэффициента сопротивления  $\zeta_1$  параллельной задвижки в круглой трубе от степени открытия  $h/D_1$ .

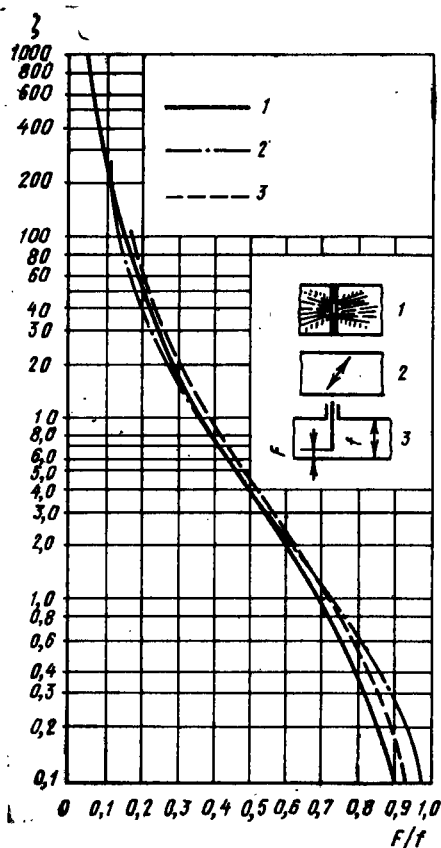


Рис. 104. Коэффициент местного сопротивления для дросселирующих устройств: 1 — диафрагма с острыми кромками; 2 — поворотный клапан; 3 — шибер ( $F/f$  — относительное живое сечение шибера)

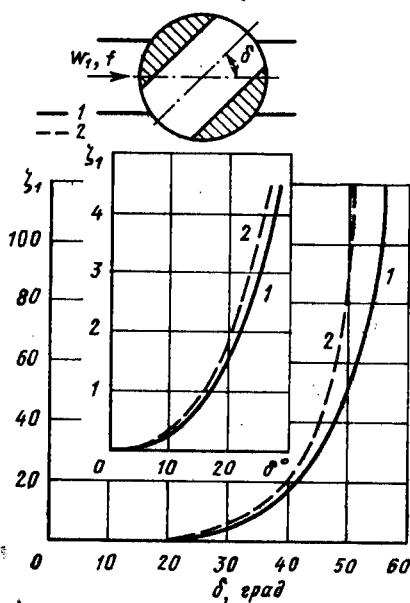


Рис. 105. Зависимость коэффициента сопротивления  $\zeta_1$  пробкового крана в трубах круглого и прямоугольного сечения от угла открытия  $\delta$ : 1 — круглое сечение; 2 — прямоугольное сечение

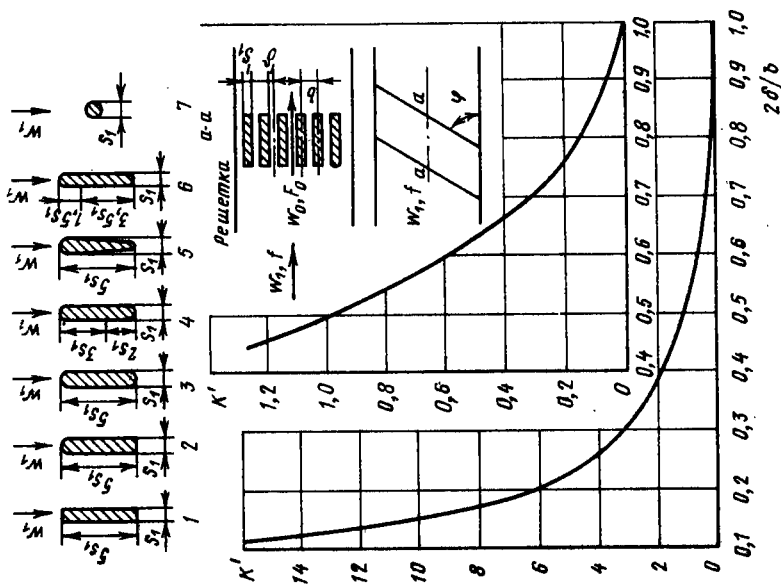


Рис. 106. Зависимость коэффициента  $K'$  от отношения  $2\delta/b$  для стержневых решеток:

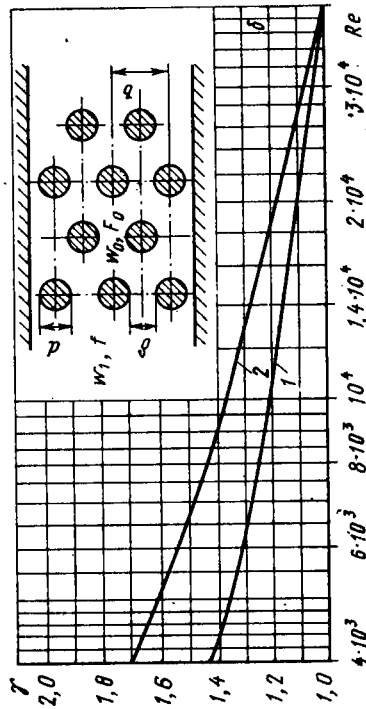
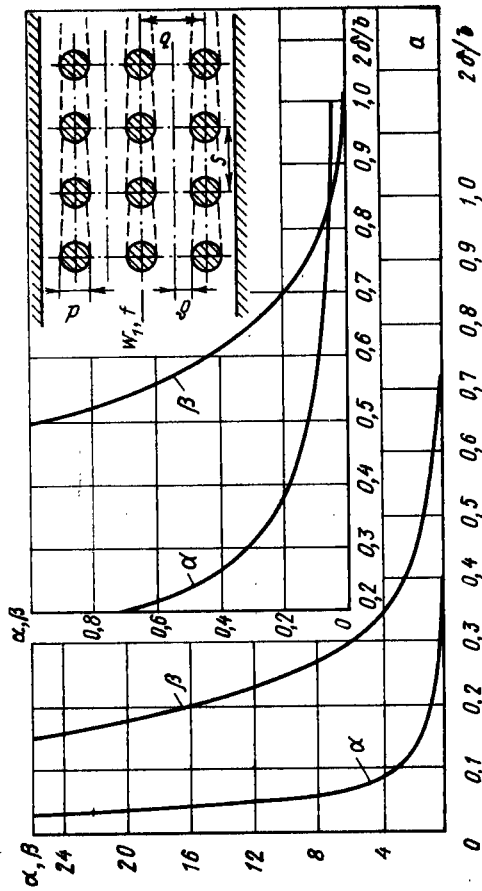


Рис. 107. Вспомогательные графики для определения коэффициента сопротивления пучка труб:

а — коридорный пучок; б — шахматный пучок

Коэффициент местного сопротивления пучка труб при значении критерия  $Re \geq 4 \cdot 10^4$  находят по формулам:  
коридорный пучок труб

$$\zeta_1 = n \frac{s}{b} \alpha + \beta;$$

шахматный пучок труб

$$\zeta_1 = 0,7 \div 0,8 \left( n \frac{s}{b} \alpha + \beta \right).$$

Здесь  $\alpha$  и  $\beta$  — функции, зависящие от коэффициента живого сечения  $2\delta/b$ :

$$\alpha = 0,028 \left( \frac{b}{2\delta} \right)^2 \text{ и } \beta = \left( \frac{b}{2\delta} - 1 \right)^2.$$

Значения  $\alpha$  и  $\beta$  приведены на рис. 107, а, б.

$s$  — расстояние между осями рядов труб;

$b$  — расстояние между осями труб в ряду;

$n$  — число межрядных участков вдоль канала.

При значении критерия  $Re < 4 \cdot 10^4$  коэффициент местного сопротивления  $\zeta'_1$  находится из выражения  $\zeta'_1 = \gamma \cdot \zeta_1$ , где  $\gamma$  — поправочный коэффициент, определяемый по рис. 107.

### 3. Выход потока из канала

При свободном выходе из канала любого сечения коэффициент местного сопротивления  $\zeta=1$  и относится к скорости потока в канале.

При истечении из отверстия в неограниченное пространство — выход через шайбу или решетку на конце трубы — коэффициент сопротивления вычисляется по формуле

$$\zeta_0 = \left( 1 + 0,707 \sqrt{1 - \frac{F}{f}} \right)^2 \left( \frac{f}{F} \right)^2.$$

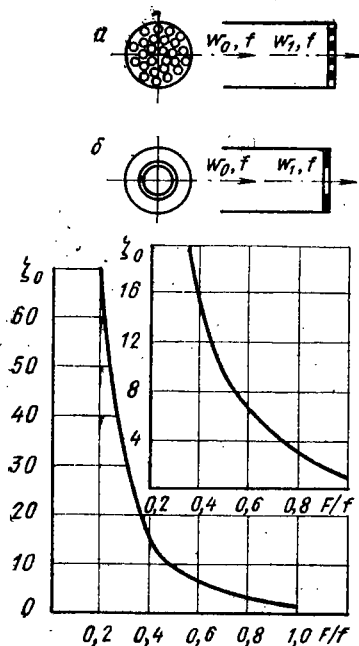


Рис. 108. Зависимость коэффициента сопротивления  $\zeta_0$  истечению из отверстия в неограниченное пространство от отношения площадей  $F/f$  ( $F$  — живое сечение решетки или шайбы):  
а — решетка; б — шайба

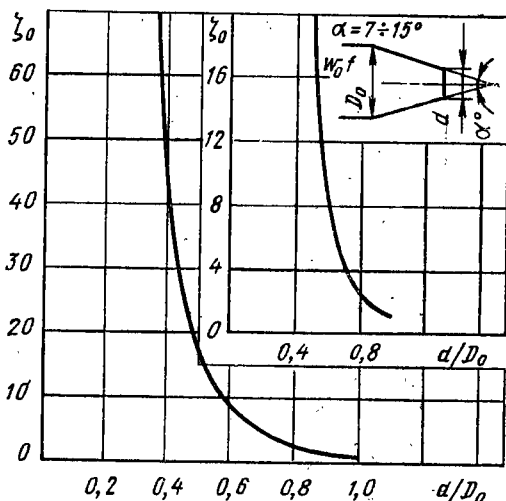


Рис. 109. Коэффициент сопротивления для плавно сужающейся насадки (сопло) с  $\alpha = 7 \div 15^\circ$

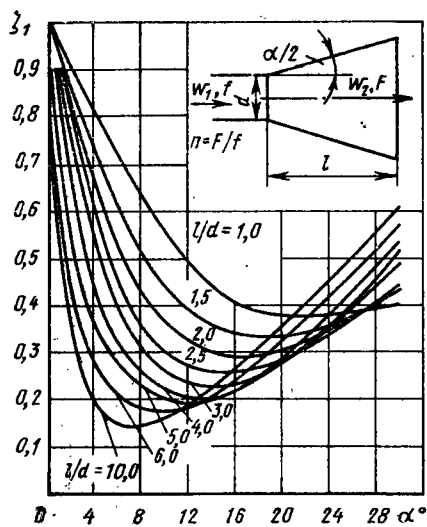


Рис. 110. Зависимость расчетного значения коэффициента полного сопротивления  $\xi_1$  диффузора круглого сечения со свободным выходом потока из сети от угла расширения  $\alpha$  при различных относительных длинах  $l/d$

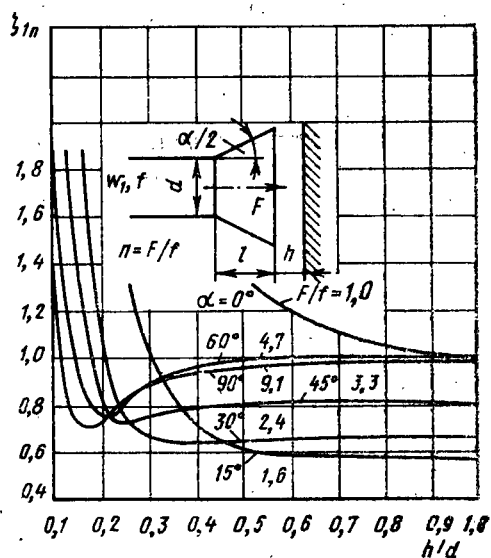


Рис. 111. Зависимость коэффициента полного сопротивления диффузора круглого сечения от относительного расстояния  $h/d$  до экрана при различных значениях угла расширения

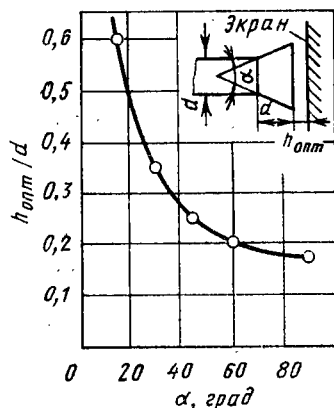


Рис. 112. Зависимость оптимального значения относительного расстояния  $h/d$  экрана до выходного отверстия от угла расширения  $\alpha$

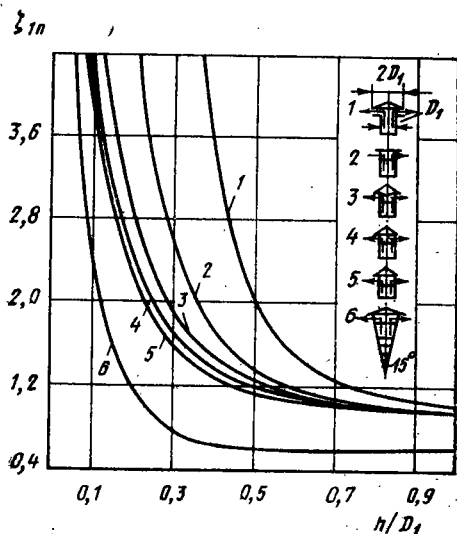


Рис. 113. Зависимость коэффициента сопротивления  $\xi_{1n}$  круглых вытяжных шахт (выход из сети от относительного расстояния  $h/D_1$  между зонтом и шахтой)

Зависимость  $\zeta_0$  от  $F/f$  дана на рис. 108. Выход потока из плавного сужающейся насадки определяют по формуле

$$\zeta_0 \approx 1,05 \left( \frac{D_0}{d} \right)^4,$$

графически представленной на рис. 109.

При установке на выходе из канала круглого диффузора коэффициент полного сопротивления может быть определен по рис. 110

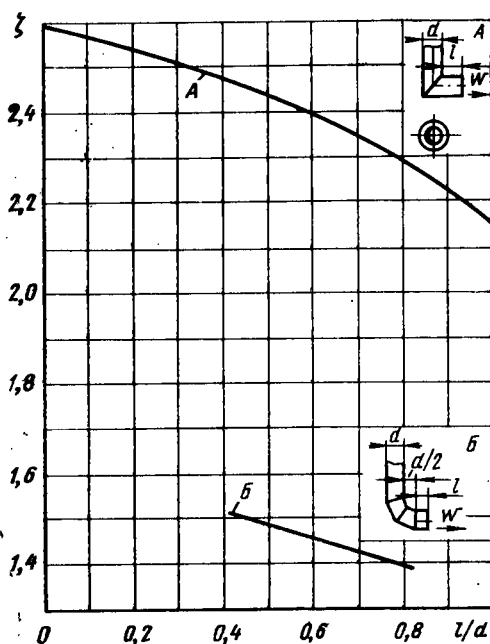


Рис. 114. Коэффициент местного сопротивления при выходе через насадку-колесо

в зависимости от угла раскрытия диффузора  $\alpha$  и его относительной длины  $l/d$ . При выходе потока через диффузор на экран величина коэффициента местного сопротивления приведена на рис. 111. Как видно на графике, установка экрана оказывает двойное влияние на величину  $\zeta_{in}$ . На рис. 112 приведено оптимальное значение относительного расстояния диффузора от экрана при различных углах раскрытия диффузора  $\alpha$ . Коэффициент сопротивления выхода из канала под колпак — вытяжные шахты — представлен на рис. 113, а выход через насадку-колесо приведен на рис. 114, в величину  $\zeta$  включена потеря выхода.

При боковом выходе через последнее отверстие в канале значение коэффициента сопротивления, отнесенного к скорости выхода, составляет  $\zeta = 2.5$ .

#### 4. Вход потока в канал

Зависимость коэффициента сопротивления прямого входа от относительного расстояния входного отверстия до стенки, в которую заделана труба, дана на рис. 115.

Для случая заделки входа в канал заподлицо со стенкой  $\zeta_1 = 0.5$ .

Коэффициенты сопротивления заделанных и незаделанных в стенку коллекторов, очерченных по дуге окружности, определяют по рис. 116.

Для коллекторов с прямыми образующими (конические коллекторы) коэффициенты сопротивления вычисляются по рис. 117 и 118.

Для промышленных установок целесообразно использовать конические коллекторы с относительной длиной  $l/d$  не более 0,2—0,3 и с углом сужения  $\varphi = 40—80^\circ$ .

В том случае, когда вход в канал сечения  $F_1$  происходит не из неограниченного пространства, а из канала большего, но соизмеримого се-

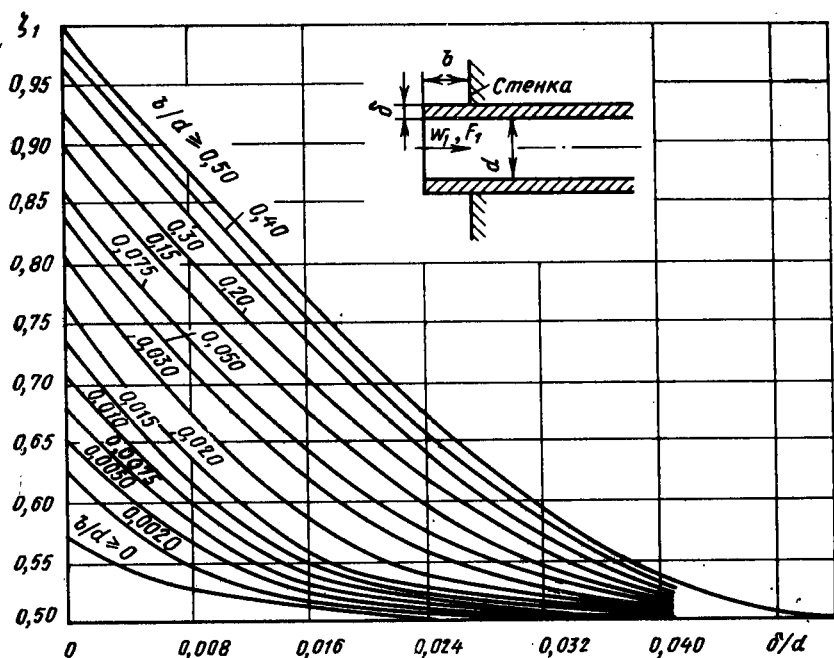


Рис. 115. Вспомогательные кривые для определения коэффициентов сопротивления прямых входов

чения  $F_0$ , коэффициент сопротивления входа, отнесенный, как обычно, к меньшему сечению  $F$ , определяют по формуле

$$\zeta = \zeta_1 \left( 1 - \frac{F_1}{F_0} \right),$$

где  $\zeta$  — принимают в зависимости от формы входа по соответствующему графику на рис. 118—122.

Влияние относительного расстояния экрана и относительной толщины стенки канала на коэффициент сопротивления при входе представлено на рис. 119.

Для любой формы входа с экраном общий коэффициент сопротивления может быть представлен как сумма двух сопротивлений

$$\zeta_{1\text{ экр}} = \zeta_1 + \Delta \zeta_1,$$

где  $\zeta_1$  — коэффициент сопротивления входа любой формы без экрана (см. рис. 115—118);

$\Delta \zeta_1 = \frac{\sigma}{n^2}$  — коэффициент той части сопротивления, которая вызывается присутствием экрана;

$\sigma$  — коэффициент, учитывающий влияние экрана и зависящий от относительного расстояния  $h/d$ ;

$n = \frac{F_{\text{вх}}}{F_1}$  — отношение площади входного отверстия к площади трубы после входа.

Значения  $\sigma$  приведены на рис. 120.

Коэффициент сопротивления входа в канал из-под колпака — приточные шахты — приведен на рис. 121.

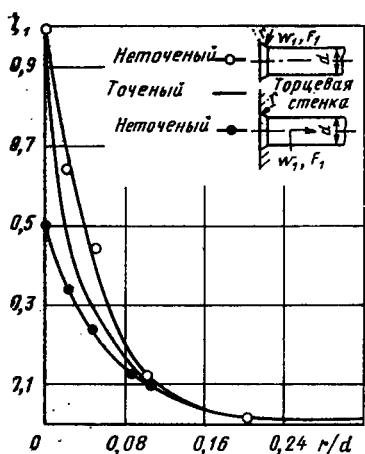


Рис. 116. Зависимость коэффициента сопротивления  $\zeta_1$  коллекторов, профилированных по дуге круга, от относительного радиуса закругления  $r/d$

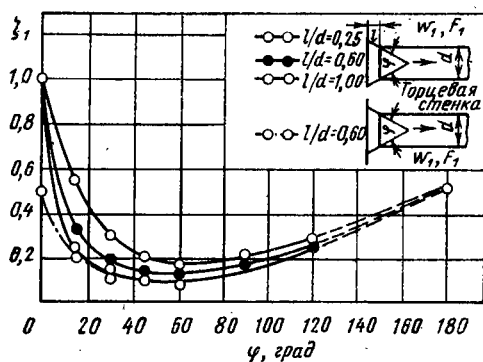


Рис. 117. Зависимость коэффициента сопротивления  $\zeta_1$  конических коллекторов от угла сужения  $\varphi$  при различных  $l/d$

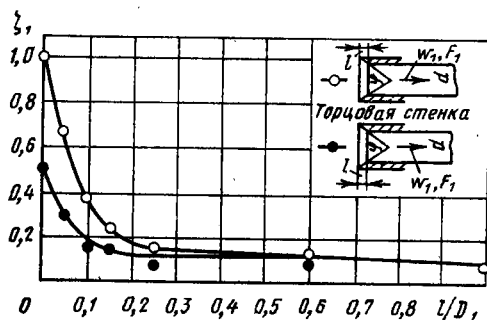


Рис. 118. Зависимость коэффициента сопротивления конических коллекторов от относительной длины  $l/d$  при  $\varphi = 60^\circ$

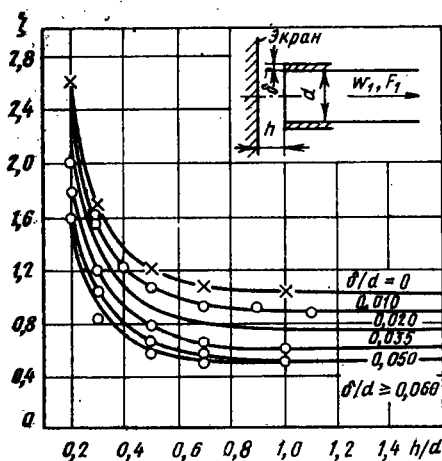


Рис. 119. Зависимость коэффициента сопротивления  $\zeta$  прямого входа от относительного расстояния  $h/d$  до экрана при различной относительной толщине  $\delta/d$

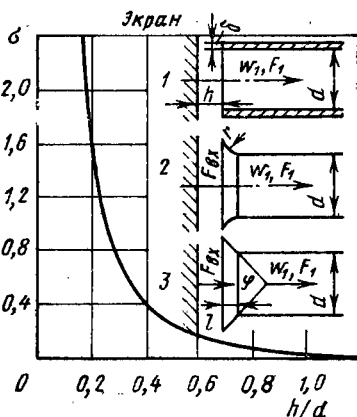


Рис. 120. Зависимость коэффициента  $\sigma$  от относительного расстояния  $h/d$

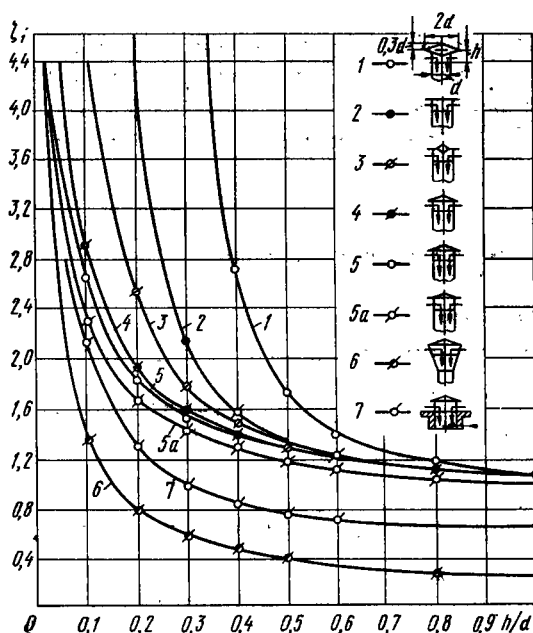


Рис. 121. Зависимость коэффициента сопротивления  $\zeta_1$  приточных шахт от относительного расстояния  $h/d$  до зонта при  $\delta/d$ :  
 $5a - 0,01$ ;  $7 - 0,025$ . Все остальные — при  $\delta/d = 0$

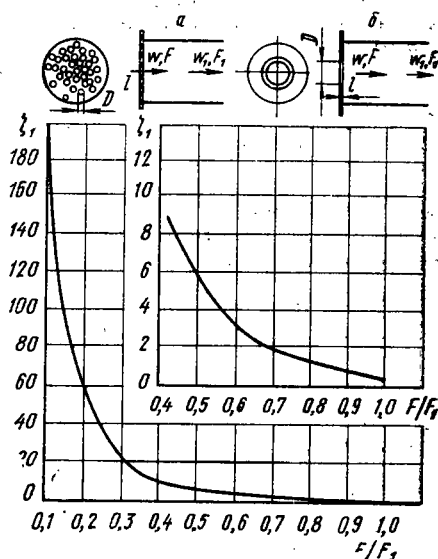


Рис. 122. Зависимость коэффициента сопротивления  $\zeta_1$  входа в прямую трубу через плоскую решетку (а) или шайбу (б) от относительного живого сечения  $F/F_1$ .

При прямом входе в канал и наличии на входе плоской решетки или дроссельной шайбы с острыми краями коэффициент сопротивления определяется по формуле

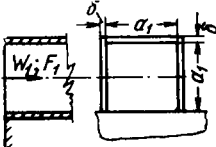
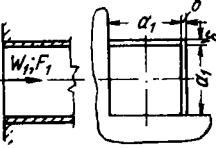
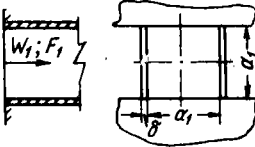
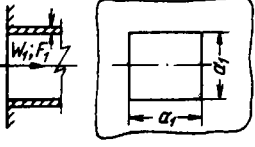
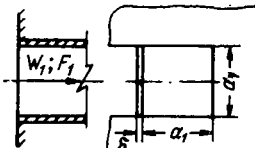
$$\zeta_1 = \left(1,7 - \frac{F}{F_1}\right)^2 \left(\frac{F_1}{F}\right)^2.$$

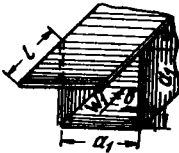
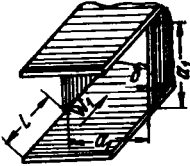
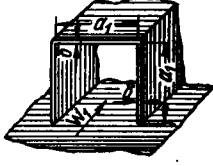
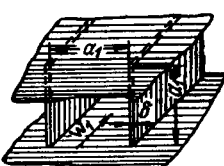
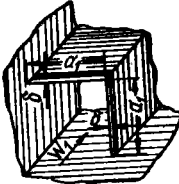
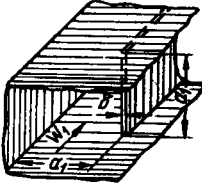
Зависимость  $\zeta_1$  от относительного живого сечения приведена на рис. 122.

В табл. IX-3 приведен ряд примеров, встречающихся на практике, для различных образом произведенной заделки в стенку входного отверстия и расположения входного участка трубы относительно стенок в зависимости от тех или иных конструктивных или строительных условий.

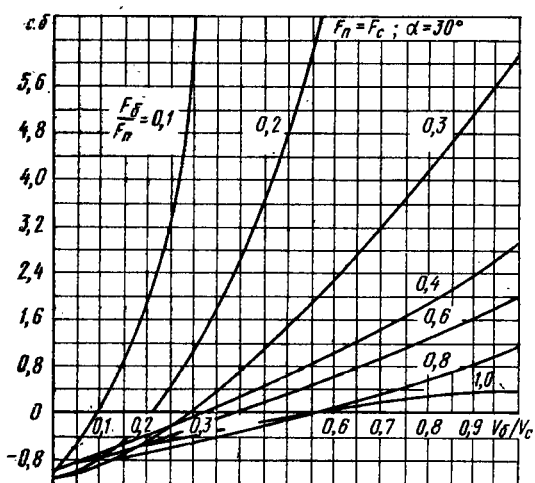
Таблица IX-3

Коэффициенты местного сопротивления различных случаев входа в каналы

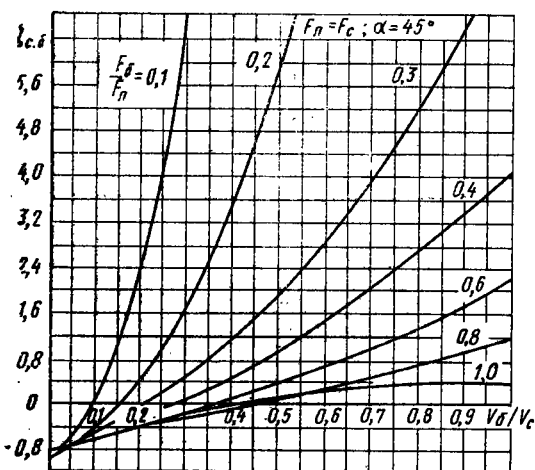
| Наименование входа                                                                     | Схема                                                                               | Коэффициент сопротивления $\zeta_1$ |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Прямой вход (без стенок)                                                               |    | 0,6                                 |
| Вход с торцевой стенкой, установленной с одной стороны трубы (канала)                  |    | 0,58                                |
| Вход с торцевыми стенками, установленными с двух смежных сторон трубы (канала)         |    | 0,55                                |
| Вход с торцевыми стенками, установленными с двух противоположных сторон трубы (канала) |  | 0,55                                |
| Вход с торцевыми стенками, установленными с трех сторон трубы (канала)                 |  | 0,52                                |
| Вход с торцевыми стенками, установленными с четырех сторон трубы (канала)              |  | 0,50                                |

| Наименование входа                                                           | Схема                                                                               | Коэффициент сопротивления $\zeta_1$ |
|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Вход с козырьком с одной стороны трубы (канала) при $\frac{l}{a_1} = 0,5$    |    | 0,67                                |
| Вход с козырьком с двух сторон трубы (канала) при $\frac{l}{a_1} = 0,5$      |    | 0,82                                |
| Вход в трубу (канал), расположенную на стенке                                |    | 0,63                                |
| Вход в трубу (канал), заделанную между двумя стенками                        |   | 0,71                                |
| Вход в трубу (канал), расположенную в двупланном углу (между двумя стенками) |  | 0,77                                |
| Вход в трубу (канал), зажатую между тремя стенками                           |  | 0,92                                |

При боковом входе в трубу (в прорезь) для первого отверстия коэффициент местного сопротивления, отнесенный к скорости в отверстии, равен  $\zeta = 0,6$ .



a



b

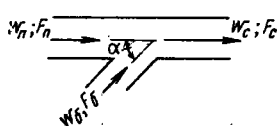
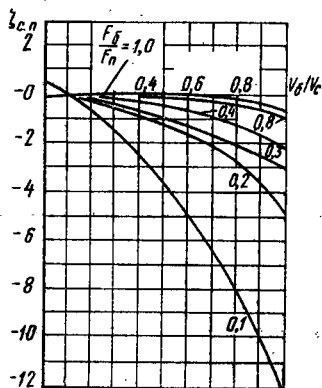
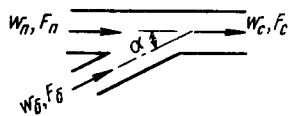
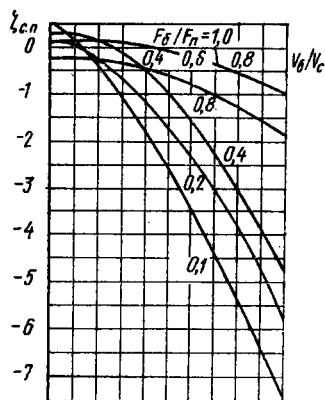
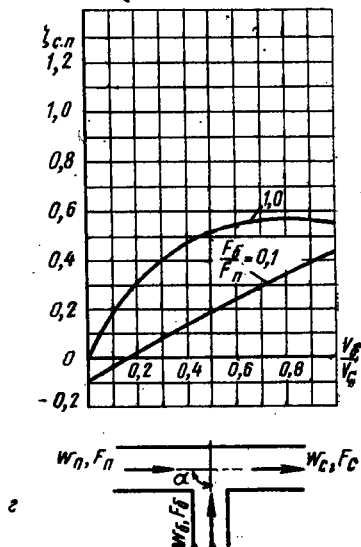
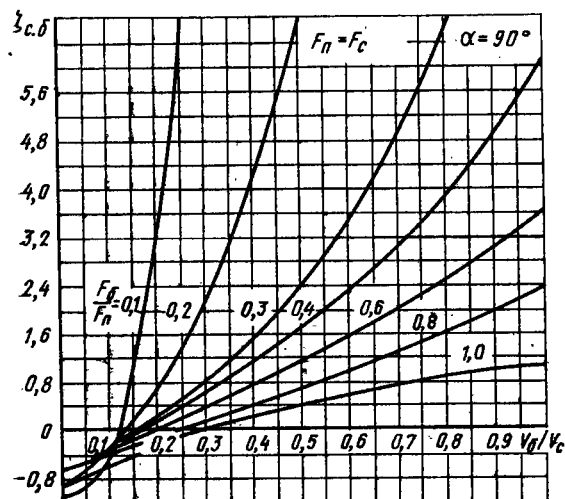
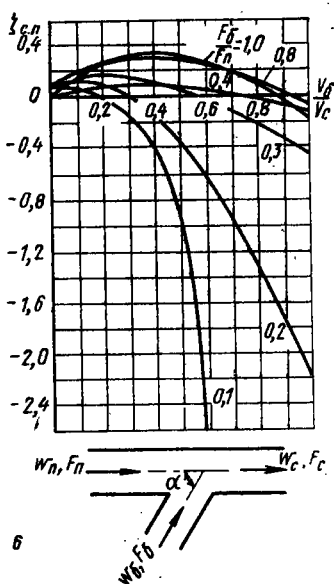
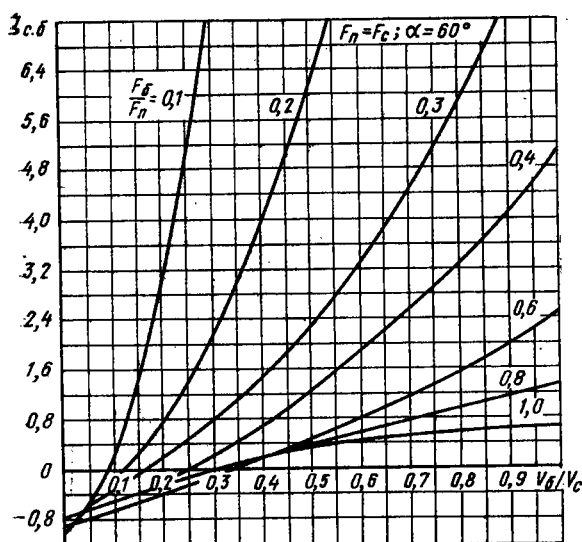


Рис. 123. Коэффициенты сопротивления собирающих тройников ( $F_{\delta} + F_{\Pi} > F_c$ ;  $F_{\Pi} = F_c$ ) при  $\alpha - 30$ ; б - 45;

## 5. Слияние и разделение потоков

Коэффициенты сопротивления тройников даются в зависимости от отношения площадей бокового ответвления и проходного канала  $F_{\delta}/F_{\Pi}$  и отношения расходов жидкости по боковому ответвлению и суммарного в сборном канале  $V_{\delta}/V_c$ ; коэффициент сопротивления бокового канала

$$\zeta_{\delta} = \frac{h_{\text{пот. } \delta}}{\rho w_{\delta}^2 / 2g} = \zeta_{c, \delta} \left( \frac{V_c}{V_{\delta}} \cdot \frac{F_{\delta}}{F_c} \right)^2 = \zeta_{c, \delta} \left( \frac{w_c}{w_{\delta}} \right)^2;$$



различных значениях  $\alpha$ , град:

$\alpha$  — 60;  $\alpha$  — 90

для проходного канала

$$\zeta_{п} = \frac{h_{пот. п}}{\frac{\rho w_{п}^2}{2g}} = \zeta_{с. п} \frac{1}{\left(1 - \frac{V_6}{V_c}\right)^2}.$$

Значения коэффициентов сопротивления

$$\zeta_{с. в} = f\left(\frac{V_6}{V_c}\right) \text{ и } \zeta_{с. п} = f\left(\frac{V_6}{V_c}\right)$$

для случая слияния потоков даны на рис. 123, а—г при  $F_{п}=F_{с}$  и различных углах  $\alpha$  и на рис. 124, а для встречного вхождения бокового потока.

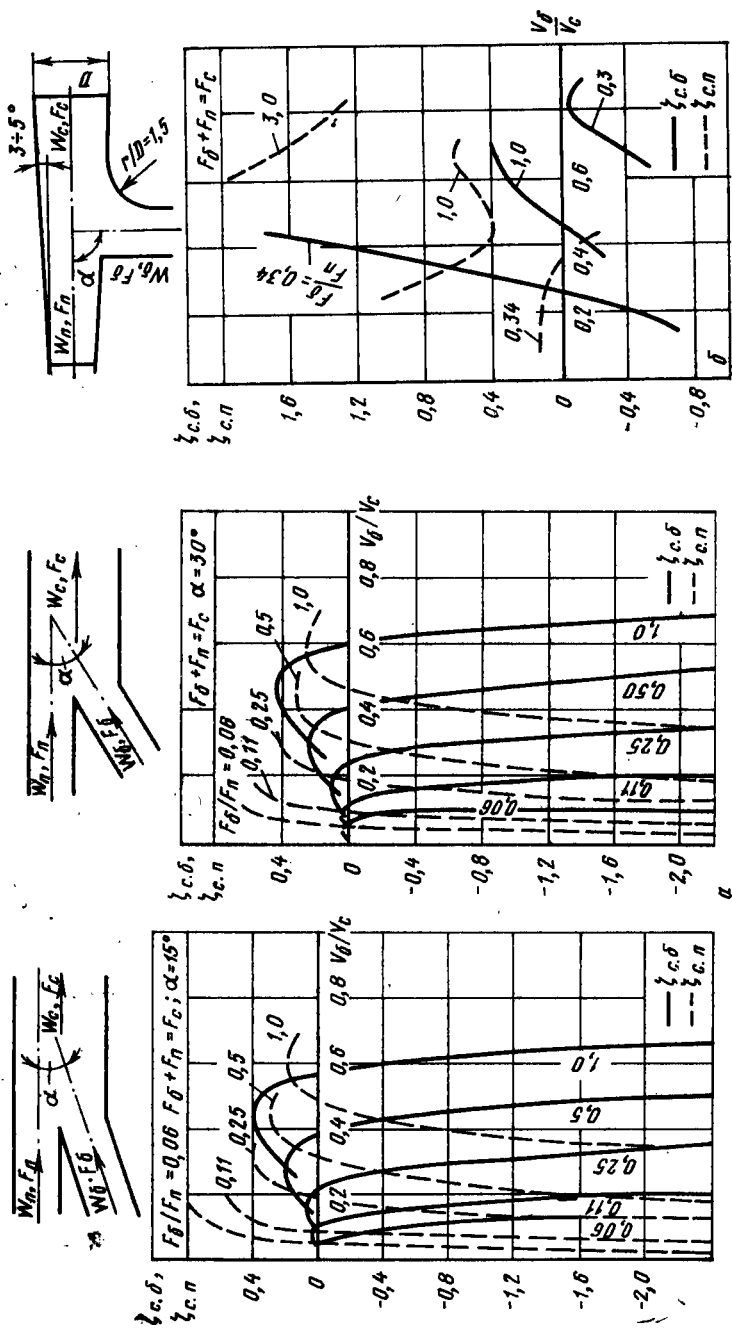
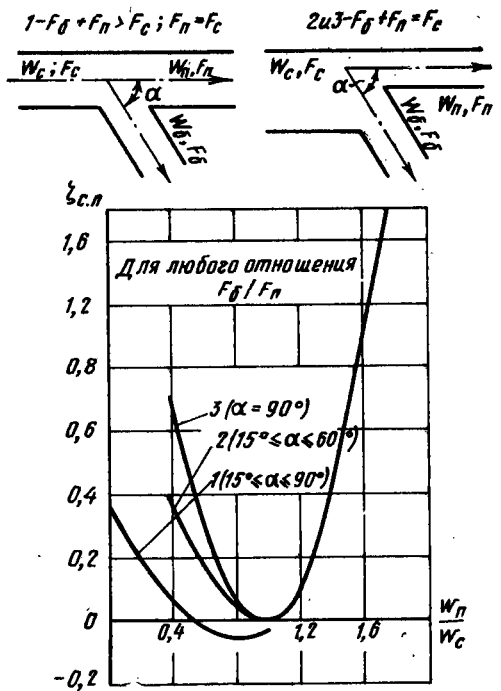


Рис. 124. Коэффициент сопротивления собирающих тройников ( $F_\delta + F_\pi = F_c$ ):  
 $a$  — с цилиндрическим проходом;  $b$  — с плавным ответвлением при  $\alpha = 90^\circ$

Рис. 125. Коэффициент сопротивления тройников любого типа с цилиндрическим проходом



При соотношении площадей каналов  $F_6 + F_\pi = F_c$  коэффициенты сопротивления определяются из выражений

$$\zeta_6 = \zeta_{с.6} \frac{1}{\left(\frac{V_6}{V_c} \cdot \frac{F_c}{F_6}\right)^2} \quad \text{и} \quad \zeta_\pi = \zeta_{с.п} \frac{1}{\left(1 - \frac{V_6}{V_c}\right)^2 \left(\frac{F_c}{F_\pi}\right)^2}.$$

Значения  $\zeta_{с.6}$  и  $\zeta_{с.п}$  приведены на графиках рис. 124, а, б.

Для случая прохождения канала следует пользоваться рис. 125. При разделении потока в тройнике коэффициент сопротивления  $\zeta_6$  определяется из соотношения

$$\zeta_6 = \frac{\zeta_{с.6}}{\left(\frac{V_6}{V_c} \cdot \frac{F_c}{F_6}\right)^2}.$$

Значения  $\zeta_{с.6} = f\left(\frac{V_6}{V_c}\right)$  приведены на рис. 126.

Для разделения потока с соотношением площадей  $F_6 + F_\pi = F_c$  и коническим проходом значения  $\zeta_{с.6}$  и  $\zeta_{с.п}$  приведены на рис. 127 для различных углов  $\alpha$ .

Закругление кромок ответвлений и незначительное расширение входных сечений заметно уменьшают коэффициенты сопротивления тройников.

При расчете сопротивления симметричных тройников их условно разделяют на два самостоятельные поворота, причем сечение общего канала принимают разделенным продольной перегородкой пропорционально расходам через каждый из рукавов. Сопротивление тройника по каждому из потоков рассчитывают, как для соответствующего резкого поворота.

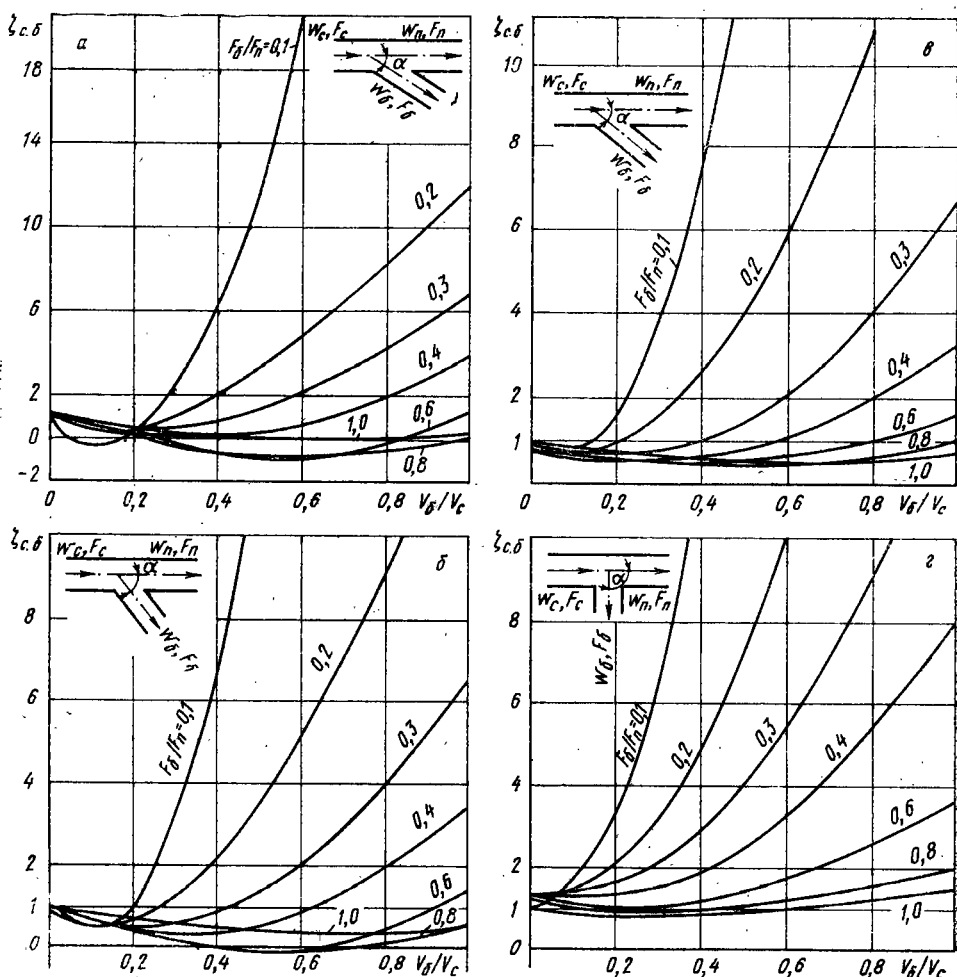


Рис. 126. Коэффициент сопротивления раздающих тройников при  $F_{\Pi} = F_c$  и различных значениях  $\alpha$ , град:  
 а — 30; б — 45; в — 60; г — 90

## 6. Сыпучие материалы

В настоящее время отсутствуют данные, позволяющие выполнить универсальный расчет сопротивления слоя сыпучих материалов. Имеющиеся экспериментальные формулы пригодны для условий, близких к проведенным опытам.

Хейлигенштедт дает формулу для расчета потери давления в слое материалов  $h_{\text{пот}}$  в мм вод. ст. на 1 м высоты слоя:

$$h_{\text{пот}} = n \rho \omega^{1,9},$$

где  $\rho$  — плотность воздуха или газа и  $\omega$  — его скорость;

$n$  — константа, для зерен размером  $60 \pm 10$  мм  $n=11$ ;  $45 \pm 5$  мм  $n=14 \div 18$ ;  $35 \pm 5$  мм  $n=28$ ;  $25 \pm 5$  мм  $n=55$ .

В. И. Борошанский рекомендует для слоя шаров диаметром  $d$ , засыпанных произвольно и имеющих порозность (долю пустоты в объеме

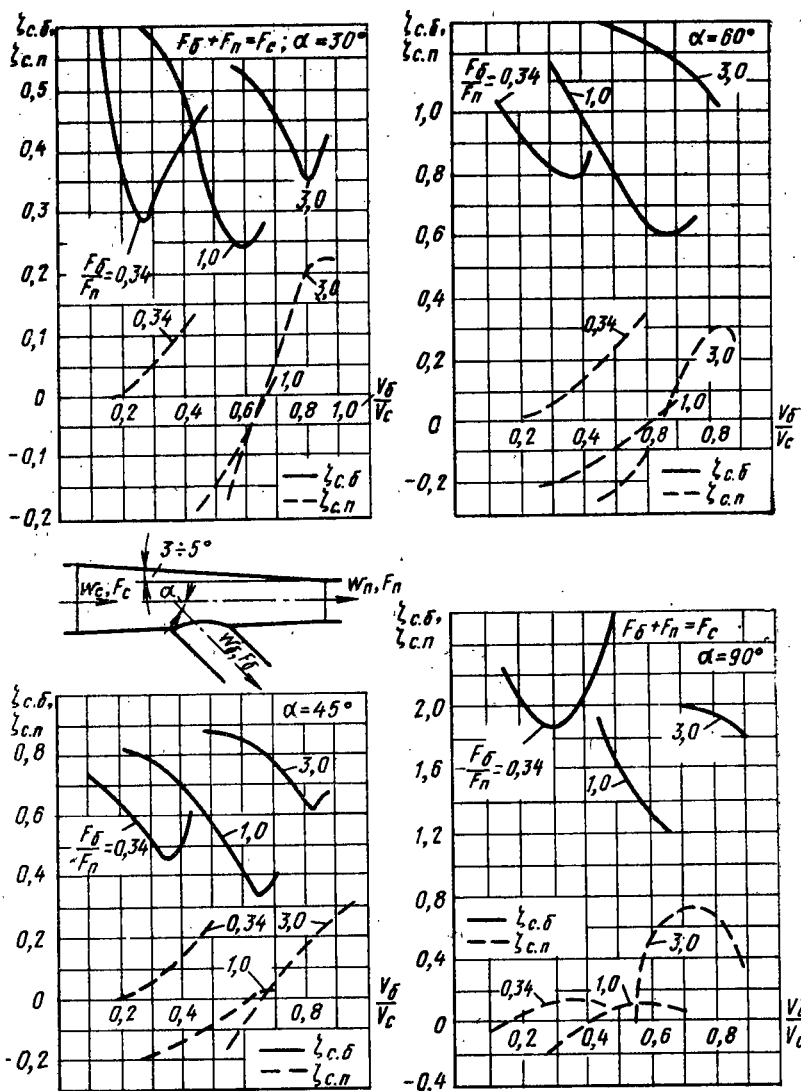


Рис. 127. Коэффициент сопротивления раздвигающих тройников с коническим проходом  $F_г + F_п = F_c$  для различных углов  $\alpha$

засыпки), близкую к 0,4 (см. данные на с. 242), при числах  $Re_{сл} = \omega d/\nu = 1 \div 5000$  следующую приближенную формулу:

$$\zeta_{сл} = 20 + \frac{7000}{Re_{сл}}.$$

Н. Н. Жаворонков на основании своих исследований дает следующую формулу для сопротивления слоя кусковых материалов:

$$h_{пот} = \frac{7,6 \rho \omega^{0,8} \sqrt{0,2} H}{g d_{гидр} f^{1,8}} \text{ мм вод. ст.,}$$

где  $H$  — высота слоя;

$\omega$  — скорость газа, отнесенная к полному сечению шахты, м/с;

$d_{гидр}$  — гидравлический диаметр канала, м;

$$d_{гидр} = \frac{2}{3} d_{эпв} \frac{f}{1-f}.$$

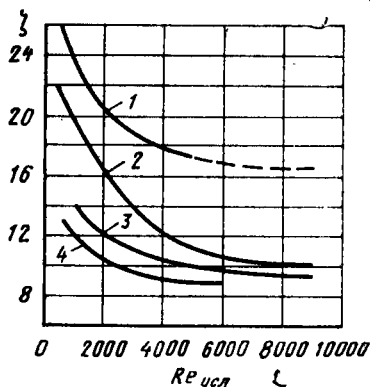


Рис. 128. Коэффициент сопротивления слоя кусковых материалов в зависимости от  $Re_{усл}$ :

1 — агломерат — остроугольные куски ( $d_{ср} = 12-82$  мм), насыпная масса  $\rho = 1140-1470$  кг/м<sup>3</sup>; 2 — известковая руда ( $d_{ср} = 14-100$  мм),  $\rho = 1380-1620$  кг/м<sup>3</sup>; 3 — кокс ( $d_{ср} = 1-100$  мм),  $\rho = 513-835$  кг/м<sup>3</sup>; 4 — агломерат из вращающейся печи — окатанные куски ( $d_{ср} = 14-52$  мм),  $\rho = 1475-1900$  кг/м<sup>3</sup>

Здесь  $f$  — порозность, т. е. доля пустоты в объеме засыпки.

За последнее время широкое применение получило выражение, аналогичное формуле потери напора на трение:

$$h_{пот} = \xi \frac{\rho w^3}{2g} \cdot \frac{H}{d_{экр}} \text{ мм вод. ст.},$$

где  $\xi$  — коэффициент сопротивления, определяемый по рис. 128;

$w$  — условная скорость движения, отнесенная к полному сечению печи, м/с;

$d_{экр}$  — средневзвешенный размер куска.

Относительная пористость при различной укладке шаров

| Укладка                                     | Пористость, % |
|---------------------------------------------|---------------|
| Шары одного размера:                        |               |
| наиболее рыхлая укладка (кубическая)        | 48,6          |
| наиболее плотная укладка (ромбодекаэдр)     | 25,9          |
| Шары двух размеров (1—0,732)                | 27,1          |
| Шары трех размеров (1—0,732—0,268)          | 24,0          |
| Шары четырех размеров (1—0,732—0,268—0,178) | 17,0          |
| Шары двух размеров (1—0,414)                | 20,6          |
| Шары трех размеров (1—0,414—0,225)          | 19,0          |
| Шары четырех размеров (1—0,414—0,225—0,177) | 15,8          |

## 7. Течение газо-жидкостной смеси

Падение давления при течении в каналах паро-жидкостных и газо-жидкостных смесей  $\left( \frac{w'_0 d}{\nu'} > 2000 \right)$  рассчитывают по приведенным выше формулам с введением для  $\zeta_{тр}$  и  $\xi$  поправочного множителя  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = 1 + \left( 1 - \frac{\rho''}{\rho'} \right) \frac{w''_0}{w'_0 + \frac{\rho''}{\rho'} w''_0},$$

где  $w'_0$  — приведенная скорость жидкости, т. е. объемный расход жидкости, отнесенный к полной площади поперечного сечения канала;

$w''_0$  — то же, для газовой (паровой) компоненты смеси.

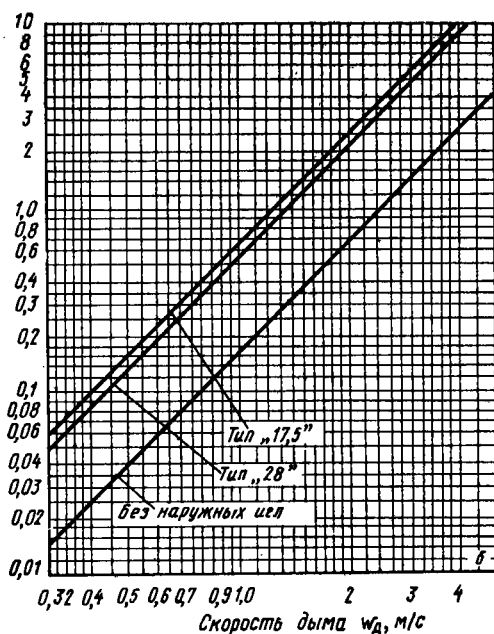
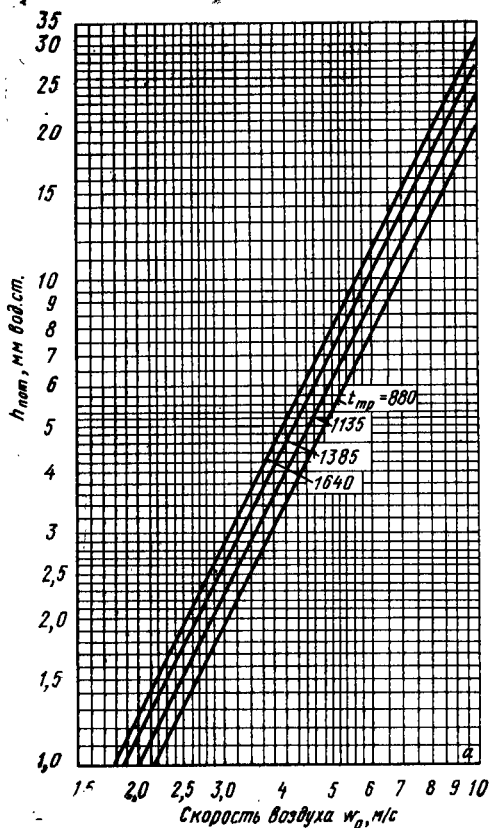
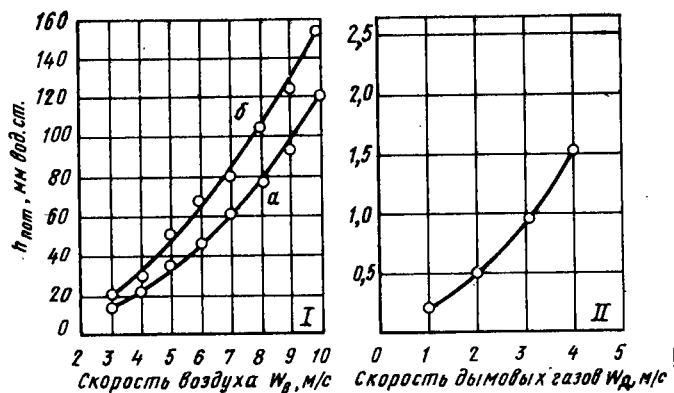


Рис. 129. Аэродинамическое сопротивление игольчатых труб на пути:  
а — воздуха (внутри); б — дымовых газов (снаружи)

Рис. 130. Аэродинамическое сопротивление рекуператора типа РИМ на воздушном (I) или дымовом (II) пути при температуре воздуха, °С: а — 30; б — 250 (на выходе из рекуператора)



Индексы «штрих» и «два штриха» относятся соответственно к характеристикам жидкой и газовой компонент потока.

## 8. Некоторые частные случаи

Потери напора при прохождении газов через элемент рекуператора — чугунную игольчатую трубу с наружными и внутренними (или только внутренними) иглами обтекаемой формы — представлены на рис. 129, а, б.

Для малых игольчатых рекуператоров реконструкции Теплопроекта (РИМ) потери напора представлены на рис. 130.

Коэффициент сопротивления на 1 м кладки регенеративной насадки, выполненной с чередующимися рядами и сквозными вертикальными каналами, определяют по формуле

$$\zeta = 1,14/\sqrt[4]{d_{\text{экв}}},$$

а для шахматного расположения

$$\zeta = 1,57/\sqrt[4]{d_{\text{экв}}},$$

где  $d_{\text{экв}}$  — эквивалентный диаметр канала насадки,

$$d_{\text{экв}} = \sqrt{4F/\pi}.$$

Переводные устройства типа «Симплекс» имеют коэффициент сопротивления  $\zeta=4$ , типа «Фортер»  $\zeta=2,5$ . При установке внутри клапана листов в виде направляющих лопаток коэффициент сопротивления снижается. В зависимости от высоты подъема  $h$  тарельчатого клапана коэффициент сопротивления меняется следующим образом ( $d$  — диаметр канала):

|                   |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $h/d$ . . . . .   | 0,15 | 0,20 | 0,25 | 0,30 | 0,35 | 0,40 | 0,45 |
| $\zeta$ . . . . . | 9    | 4,5  | 3    | 2,1  | 1,7  | 1,6  | 1,5  |

## ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ДАВЛЕНИЙ И РАЗРЕЖЕНИЙ

### ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НАГНЕТАНИЯ ГАЗОВ

Согласно ГОСТ 5976—55, центробежные вентиляторы разделяются на три группы в зависимости от создаваемого ими полного давления — статического плюс динамическое: а) вентиляторы низкого давления (с разностью полных давлений до  $1000 \text{ Н/м}^2$ , или  $100 \text{ мм вод. ст.}$ ); б) вентиляторы среднего давления (до  $3000 \text{ Н/м}^2$ , или  $300 \text{ мм вод. ст.}$ ); в) вентиляторы высокого давления (до  $15000 \text{ Н/м}^2$ , или  $1500 \text{ мм вод. ст.}$ ).

Осевые вентиляторы применяются в системах при суммарных потерях давления в сети до  $350 \text{ Н/м}^2$  ( $35 \text{ мм вод. ст.}$ ).

Конструктивное исполнение центробежных вентиляторов и положение кожухов правого (по часовой стрелке, если смотреть со стороны привода) и левого вращения показано на рис. 131. Вентиляторы одностороннего всасывания должны соответствовать схемам исполнения 1—6, а двустороннего всасывания — схеме 7.

Центробежные вентиляторы подбирают по графикам или таблицам вентиляторов.

Тип вентилятора, согласно ГОСТ 5976—55, характеризуется быстроходностью или удельным числом оборотов  $n_y$ . Быстроходность  $n_y$  вентилятора представляет собой величину, устанавливающую связь между значениями расхода воздуха  $v \text{ м}^3/\text{ч}$ , полным давлением  $H \text{ мм вод. ст.}$  при стандартных атмосферных условиях (при  $p=760 \text{ мм рт. ст.}$ ,  $t=20^\circ\text{C}$  и относительной влажности  $50\%$ ) и числом оборотов  $n$  в 1 мин:

$$n_y = \frac{n v^{1/4}}{H^{3/4}} = \frac{n \sqrt{v}}{\sqrt{H} \sqrt{H}}$$

### ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ТЯГИ

Дымовая труба предназначена для удаления продуктов сгорания из рабочего пространства печи, соединенного с ней системой боронов. Геометрический напор  $H_{\text{геом.тр}}$  (разрежение) столба горячего газа внутри трубы, расположенной в атмосфере более холодного воздуха, должен покрыть потери напора при прохождении дымовых газов по системе боронов  $\Sigma h_{\text{пот}}$ , потери на трение в самой трубе  $h_{\text{тр}}$  и потери на выхлоп в устье трубы  $h_{\text{вых}}$ .

Потери давления  $\Sigma h_{\text{пот}}$  в процессе работы печи могут увеличиваться вследствие заноса дымовых каналов пылью, увеличения подсоса воздуха через неплотности либо последующей форсированной работы печи. Поэтому величину потерь напора при расчете необходимо принимать с некоторым запасом (больше на  $30\text{—}50\%$ ).

В СССР принят закон об охране окружающей среды. Во исполнение этого закона, заботясь о чистоте воздуха в районе промышленных предприятий и расположенных рядом с ними жилых поселков, необходимо продукты сгорания отводить как можно выше от поверхности земли. Это позволит уменьшить концентрацию вредных веществ в воздушной атмосфере. В связи с этим, очевидно, необходимо рекомендовать запас тяги  $50\text{—}100\%$ , т. е. принимать коэффициент запаса  $K_3=2$ . Кроме того, для каждого типа промышленных установок, в зависимости от ко-

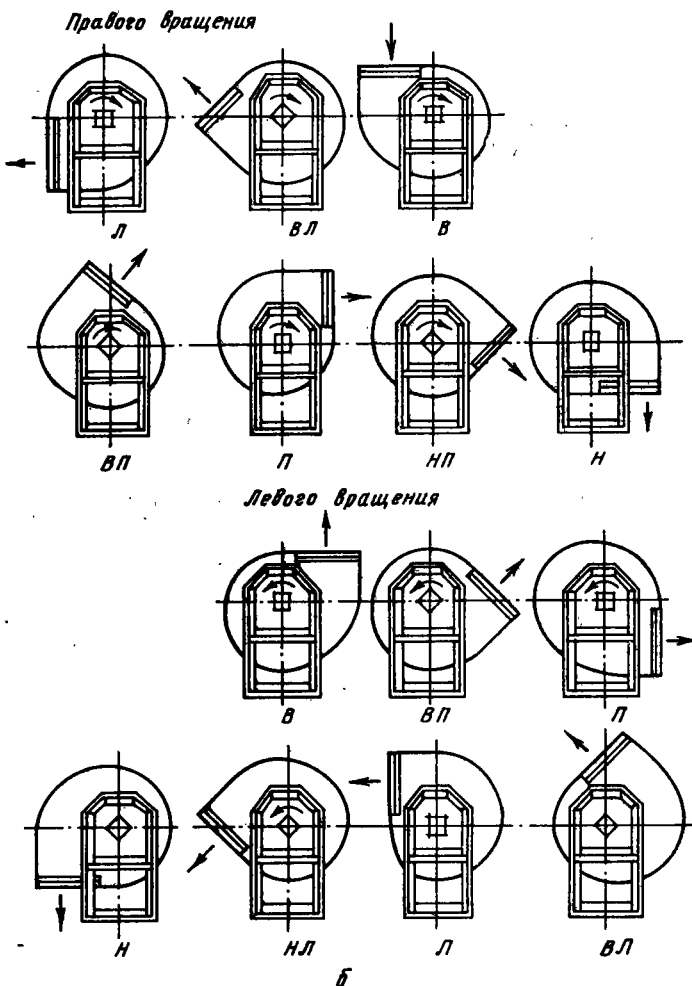
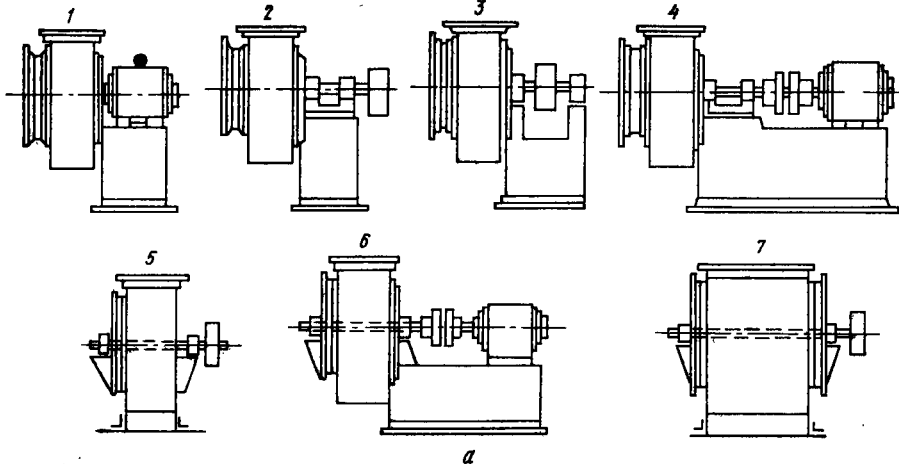


Рис. 131. Принципиальные схемы конструктивного исполнения центробежных вентиляторов по ГОСТ 5376—55:

*а* — схемы конструктивного оформления вентиляторов: 1 — установка с колесом, посаженным непосредственно на вал электродвигателя; 2 — установка с вынесенным шкивом или муфтой; 3 — установка с плоским шкивом между двумя подшипниками; 4 — установка с вынесенной муфтой и с электродвигателем на общей стойке; 5 — установка с колесом между двумя подшипниками и выносным шкивом; 6 — установка с колесом между двумя подшипниками, муфтой и электродвигателем на общей стойке; 7 — установка двустороннего вентилятора с колесом между двумя подшипниками и с выносным шкивом; *б* — схемы положения кожухов вентиляторов: Л — левое; П — правое; ВЛ — верхнее левое; ВП — верхнее правое; В — верхнее; Н — нижнее; НП — нижнее правое; НЛ — нижнее левое.

личества вредных примесей в продуктах сгорания, должны быть установлены размеры минимальной высоты дымовой трубы по санитарным условиям.

Если суммарные потери давления  $\Sigma h_{\text{пот}}$  и барометрическое давление измеряют в Н/м<sup>2</sup>, то формула для высоты дымовой трубы имеет вид:

$$H = \frac{K_3 \Sigma h_{\text{пот}} + p_0^r \left[ \frac{\omega_{02}^2}{2} (1 + \beta t_2') - \frac{\omega_{01}^2}{2} (1 + \beta t_1') \right]}{g \left( \frac{p_0^B}{1 + \beta t_B} - \frac{p_0^r}{1 + \beta t_r} \right) \frac{B}{101,32} - \mu \frac{p_0^r}{2 d_{\text{ср}}} \left[ \frac{\omega_{01}^2}{2} (1 + \beta t_1') + \frac{\omega_{02}^2}{2} (1 + \beta t_2') \right]} \text{ м.}$$

Если величины давлений измеряют в миллиметрах водяного столба, то уравнение для определения высоты дымовой трубы имеет вид:

$$H = \frac{K_3 \Sigma h_{\text{пот}} + \frac{p_0}{2g} [\omega_{02}^2 (1 + \beta t_2') - \omega_{01}^2 (1 + \beta t_1')]}{\left( \frac{p_0^B}{1 + \beta t_B} - \frac{p_0^r}{1 + \beta t_r} \right) \frac{B}{760} - \frac{\mu}{2 d_{\text{ср}}} p_0^r \left[ \frac{\omega_{01}^2}{2g} (1 + \beta t_1') + \frac{\omega_{02}^2}{2g} (1 + \beta t_2') \right]},$$

где  $H$  — высота дымовой трубы, м (индекс 0 означает, что параметр относится к нормальным условиям 0°C; 760 мм рт. ст.: индексы 1 и 2 относятся к параметрам соответственно у основания трубы и устья трубы);

$t_B$  — средняя температура газов в трубе °C;

$t_B$  — средняя температура воздуха по высоте дымовой трубы, °C:

$$t_B = t_B' - \frac{\sqrt{H}}{2},$$

где  $t_B'$  — температура воздуха у основания трубы, зависящая от климатических условий. Для умеренного климата  $t_B' = 20^\circ\text{C}$ , для жаркого  $t_B' = 30^\circ\text{C}$ ;

$B$  — минимальное барометрическое давление для данной местности, мм рт. ст.;  $B$ , кН/м<sup>2</sup>;

$K_3$  — коэффициент запаса;

$d_{\text{ср}}$  — средний диаметр трубы, м;

$\mu$  — коэффициент трения в трубе, для кирпичных труб  $\mu = 0,05$ , для металлических  $\mu = 0,03$ .

Скорость в устье дымовой трубы назначают в пределах  $\omega_{02} = 2 \div 4$  м/с и определяют

$$d_{\text{уст}} = \sqrt{4V/\pi \omega_{02}}.$$

Из конструктивных соображений принимают  $d_{\text{уст}} > 800$  мм, а диаметр основания дымовой трубы  $d_{\text{осн}} = 1,5 d_{\text{уст}}$ ;

$$d_{\text{ср}} = \frac{d_{\text{осн}} + d_{\text{уст}}}{2}.$$

Тепловые потери на 1 м высоты дымовых труб составляют: для металлических футерованных труб от 40 (при  $H = 25$  м) до 50 кВт (при  $H = 100$  м) и для кирпичных труб от 20 (при  $H = 25$  м) до 30 кВт (при  $H = 100$  м). Падение температуры газов при прохождении по дымовой трубе принимают 1°C на 1 м высоты трубы для кирпичных и 3—4°C для металлических нефутерованных труб.

По номограмме рис. 132 определяют ориентировочную высоту дымовой трубы  $H'$  и по ней необходимые температуры. После этого подставляют все значения в формулу и определяют высоту дымовой трубы  $H$ , м.

Если здания вокруг трубы находятся на расстоянии, меньшем 100 м, то высота трубы должна быть на 5 м выше конька крыши здания, но не менее 16 м. Если продукты сгорания содержат в увеличенных количествах вредные газы ( $N_2O_5$ ,  $SO_2$  и др.), то высота трубы должна превышать 100 м. Дымовые трубы имеют высоту до 320 м (кирпичные до 120 м).

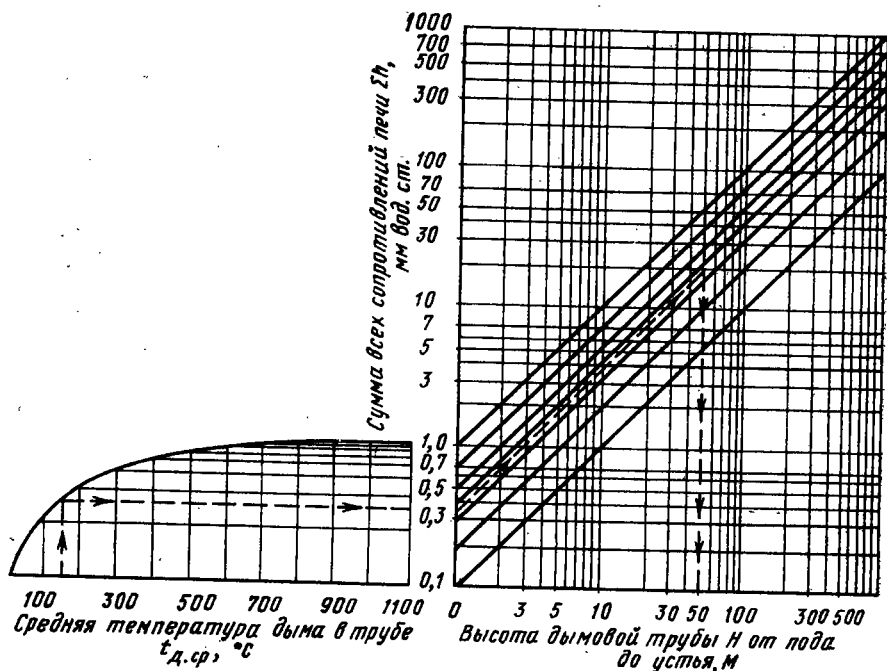


Рис. 132. График для определения высоты дымовой трубы

При больших сопротивлениях системы газоходов (например, при установке котлов-утилизаторов) для удаления продуктов горения из печей используются вентиляторы-дымососы. Характеристики дымососов даны в приведенных ниже табл. X-1—X-6 и на рис. 133 и др.

Таблица X-1

Характеристика дымососов на одной оси с электродвигателем серии В Бийского завода при различных значениях скорости вращения  $n$ , об/мин

| Номер вентилятора      | $n = 725$  |                   |           | $n = 960$  |                   |           | $n = 1425$ |                   |           |
|------------------------|------------|-------------------|-----------|------------|-------------------|-----------|------------|-------------------|-----------|
|                        | $Q$ , м³/ч | $H$ , мм вод. ст. | $N$ , кВт | $Q$ , м³/ч | $H$ , мм вод. ст. | $N$ , кВт | $Q$ , м³/ч | $H$ , мм вод. ст. | $N$ , кВт |
| При $t_B = 20^\circ C$ |            |                   |           |            |                   |           |            |                   |           |
| В № 8                  | 5000       | 73                | 1,8       | 6000       | 129               | 4,0       | 7000       | 295               | 16,0      |
|                        | 9000       | 70                | 2,8       | 12000      | 123               | 6,0       | 17000      | 285               | 25,0      |
|                        | 13000      | 63                | 4,0       | 18000      | 109               | 9,0       | 27000      | 245               | 40,0      |
|                        | 17000      | 50                | 5,1       | 24000      | 85                | 12,2      | 37000      | 180               | 55,0      |
| В № 9                  | 6000       | 92                | 3,0       | 8000       | 161               | 7,0       | 10000      | 368               | 32,0      |
|                        | 12000      | 87                | 4,6       | 15000      | 156               | 10,0      | 23000      | 358               | 35,0      |
|                        | 18000      | 78                | 6,5       | 22000      | 143               | 15,0      | 36000      | 315               | 50,0      |
|                        | 24000      | 64                | 9,0       | 30000      | 120               | 20,0      | 50000      | 238               | 74,0      |

Продолжение табл. X-1

| Номер вентилятора | n = 725 |                |        | n = 960 |                |        | n = 1425 |                |        |
|-------------------|---------|----------------|--------|---------|----------------|--------|----------|----------------|--------|
|                   | Q, м³/ч | H, мм вод. ст. | N, кВт | Q, м³/ч | H, мм вод. ст. | N, кВт | Q, м³/ч  | H, мм вод. ст. | N, кВт |
| В № 12            | 12000   | 168            | 12,5   | 15000   | 290            | 27,0   | —        | —              | —      |
|                   | 28000   | 160            | 18,0   | 33000   | 282            | 39,0   | —        | —              | —      |
|                   | 44000   | 140            | 28,0   | 51000   | 261            | 58,0   | —        | —              | —      |
|                   | 60000   | 110            | 40,0   | 70000   | 210            | 81,0   | —        | —              | —      |

При  $t_b = 200^\circ\text{C}$ .

|        |       |     |      |       |     |      |       |     |      |
|--------|-------|-----|------|-------|-----|------|-------|-----|------|
| В № 9  | 6000  | 57  | 1,7  | 8000  | 100 | 4,6  | 10000 | 230 | 15,0 |
|        | 12000 | 55  | 2,8  | 15000 | 99  | 6,7  | 23000 | 220 | 22,0 |
|        | 18000 | 50  | 4,1  | 22000 | 95  | 9,2  | 36000 | 200 | 33,0 |
|        | 24000 | 40  | 5,4  | 30000 | 78  | 12,2 | 50000 | 152 | 46,0 |
| В № 12 | 12000 | 102 | 6,0  | 15000 | 180 | 17,0 | —     | —   | —    |
|        | 28000 | 98  | 11,0 | 33000 | 177 | 26,0 | —     | —   | —    |
|        | 44000 | 91  | 16,0 | 51000 | 170 | 37,0 | —     | —   | —    |
|        | 60000 | 65  | 23,0 | 70000 | 135 | 51,0 | —     | —   | —    |

Таблица X-2

Дымососы с шестилепестным колесом ЦАГИ одностороннего всасывания

| Тип   | Максимальная производительность $Q_{\text{max}}$ , м³/ч | n, об/мин | Полное давление H, мм вод. ст. | К. п. д. при $\frac{Q_{\text{max}}}{Q_{\text{опт}}}$ | Потребляемая мощность N, кВт | Масса нетто, кг | Направляющие аппараты |             |
|-------|---------------------------------------------------------|-----------|--------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------|-----------------|-----------------------|-------------|
|       |                                                         |           |                                |                                                      |                              |                 | тип                   | диаметр, мм |
| Д-9   | 18000                                                   | 730       | 43                             | 49/55                                                | 4,5                          | 786             | Д-308                 | 630         |
|       | 24000                                                   | 960       | 75                             | 49/55                                                | 14,0                         | 786             |                       | 630         |
|       | 36000                                                   | 1450      | 172                            | 49/55                                                | 40,0                         | 786             |                       | 630         |
| Д-12  | 44000                                                   | 730       | 85                             | 59/66                                                | 20,0                         | 1541            | Д-312                 | 840         |
|       | 58000                                                   | 960       | 145                            | 59/66                                                | 55,0                         | 1541            |                       | 840         |
| Д-12к | 20000                                                   | 730       | 96                             | —                                                    | 14,0                         | 1660            | ОК-840                | 840         |
|       | 25000                                                   | 960       | 160                            | —                                                    | 28,0                         | 1660            |                       | 840         |
| Д-14к | 40000                                                   | 730       | 120                            | —                                                    | 40,0                         | 2150            | ОК-980                | 980         |

Примечание. Технические данные приведены для температуры отсасываемых газов  $200^\circ\text{C}$ .

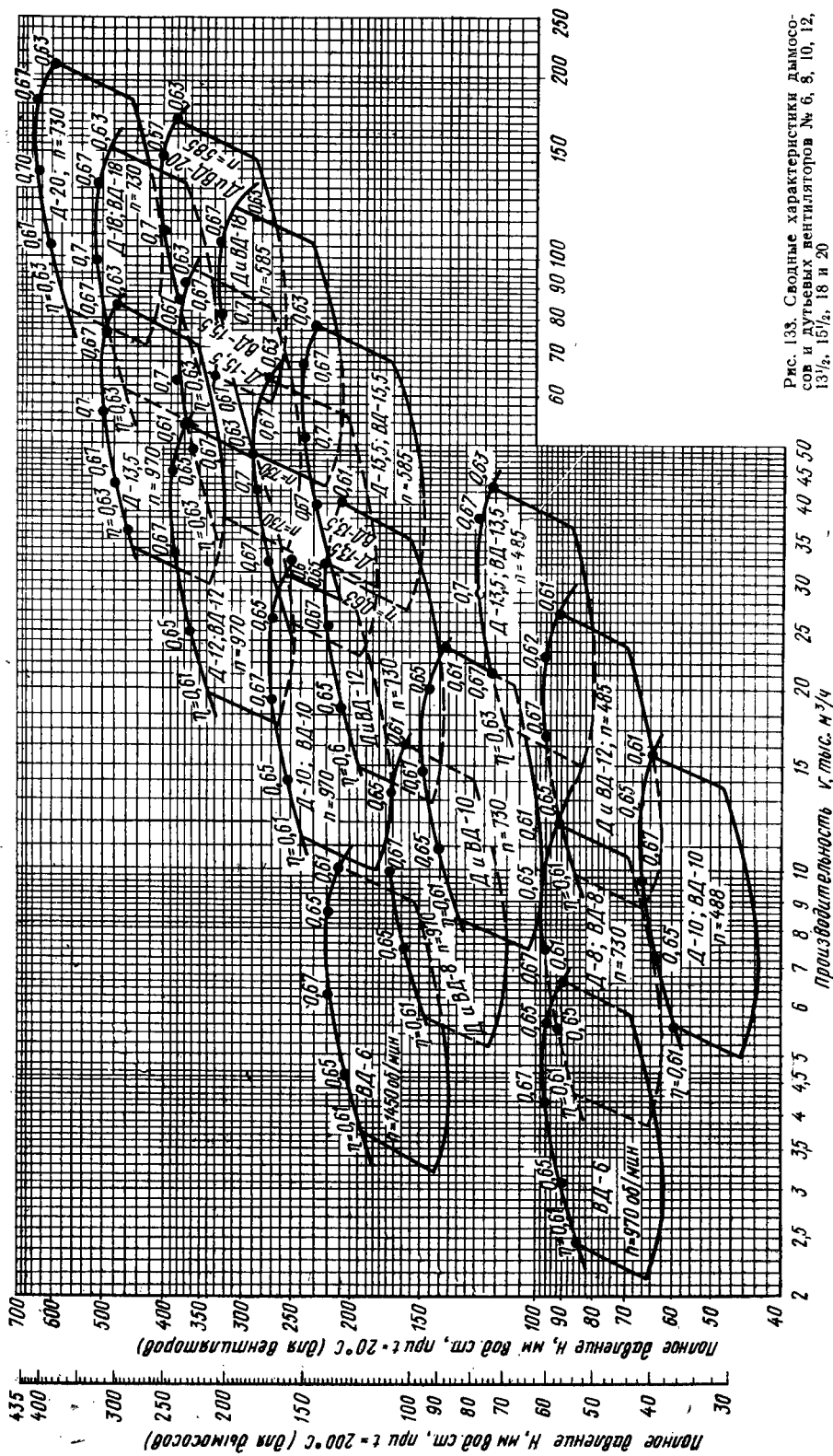


Рис. 133. Сводные характеристики дымоосов и дутьевых вентиляторов № 6, 8, 10, 12, 13½, 15½, 18 и 20

Таблица X-3

Дымососы с многолопастными колесами одностороннего всасывания типа Д-10

| Тип                       | Максимальная<br>производительность<br>$Q_{\text{тах}}$ ,<br>$\text{м}^3/\text{ч}$ | $n$ ,<br>об/мин | Полное<br>давление<br>$H$ ,<br>мм вод. ст. | К. п. д.<br>при<br>$Q_{\text{тах}}$<br>$Q_{\text{опт}}$ | Потребля-<br>емая мощ-<br>ность $N$ ,<br>кВт | Момент<br>инерции<br>ротора,<br>$\text{кг}\cdot\text{м}^2$ | Масса<br>нетто, кг |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------|
| Д-10-12,5 Н <sub>30</sub> | 105000                                                                            | 730             | 155                                        | 54/60                                                   | 80                                           | 93                                                         | 1915               |
|                           | 135000                                                                            | 960             | 265                                        | 54/60                                                   | 180                                          | 93                                                         | 1915               |
| Д-10-13 Н <sub>30</sub>   | 115000                                                                            | 730             | 165                                        | 54/60                                                   | 95                                           | 111                                                        | 1960               |
|                           | 155000                                                                            | 960             | 285                                        | 54/60                                                   | 220                                          | 111                                                        | 1960               |
| Д-10-13,5 Н <sub>30</sub> | 130000                                                                            | 730             | 175                                        | 54/60                                                   | 120                                          | 128                                                        | 2000               |
|                           | 170000                                                                            | 960             | 310                                        | 54/60                                                   | 265                                          | 128                                                        | 2000               |
| Д-10-14 Н <sub>30</sub>   | 145000                                                                            | 730             | 190                                        | 54/60                                                   | 140                                          | 127                                                        | 1980               |
|                           | 190000                                                                            | 960             | 330                                        | 54/60                                                   | 320                                          | 127                                                        | 1980               |
| Д-10-14,5 Н <sub>30</sub> | 160000                                                                            | 730             | 160                                        | 54/60                                                   | 165                                          | 154                                                        | 2025               |
|                           | 210000                                                                            | 960             | 210                                        | 54/60                                                   | 385                                          | 154                                                        | 2025               |
| Д-10-12,5 Н <sub>40</sub> | 105000                                                                            | 730             | 135                                        | 54/60                                                   | 70                                           | 86                                                         | 1900               |
|                           | 130000                                                                            | 960             | 235                                        | 54/60                                                   | 155                                          | 86                                                         | 1900               |
| Д-10-13 Н <sub>40</sub>   | 115000                                                                            | 730             | 150                                        | 54/60                                                   | 85                                           | 102                                                        | 1935               |
|                           | 155000                                                                            | 960             | 255                                        | 54/60                                                   | 200                                          | 102                                                        | 1935               |
| Д-10-13,5 Н <sub>40</sub> | 130000                                                                            | 730             | 160                                        | 54/60                                                   | 100                                          | 116                                                        | 1975               |
|                           | 170000                                                                            | 960             | 275                                        | 54/60                                                   | 240                                          | 116                                                        | 1975               |
| Д-10-14 Н <sub>40</sub>   | 145000                                                                            | 730             | 175                                        | 54/60                                                   | 125                                          | 123                                                        | 1955               |
|                           | 190000                                                                            | 960             | 295                                        | 54/60                                                   | 290                                          | 123                                                        | 1955               |
| Д-10-14,5 Н <sub>40</sub> | 160000                                                                            | 730             | 185                                        | 54/60                                                   | 145                                          | 140                                                        | 1995               |
|                           | 210000                                                                            | 960             | 320                                        | 54/60                                                   | 340                                          | 140                                                        | 1995               |
| Д-10-12,5 Э               | 57000                                                                             | 730             | 88                                         | 50/56                                                   | 28                                           | 95                                                         | 1840               |
|                           | 75000                                                                             | 960             | 155                                        | 50/56                                                   | 63                                           | 95                                                         | 1840               |
| Д-10-13 Э                 | 65000                                                                             | 730             | 96                                         | 50/60                                                   | 35                                           | 76                                                         | 1855               |
|                           | 85000                                                                             | 960             | 167                                        | 50/60                                                   | 78                                           | 76                                                         | 1855               |
| Д-10-14 Э                 | 80000                                                                             | 730             | 112                                        | 50/60                                                   | 48                                           | 94                                                         | 1880               |
|                           | 105000                                                                            | 960             | 190                                        | 50/60                                                   | 110                                          | 94                                                         | 1880               |
| Д-10-14,5 Э               | 90000                                                                             | 730             | 120                                        | 50/60                                                   | 60                                           | 101                                                        | 1890               |
|                           | 118000                                                                            | 960             | 205                                        | 50/60                                                   | 130                                          | 101                                                        | 1890               |

Примечание. Технические данные указаны для температуры всасываемого воздуха (газа) 200°C.

Таблица X-4

Дымососы с многолопастными колесами одностороннего всасывания типа Д-11

| Тип                       | Максимальная производительность $Q_{\text{max}}$ , м³/ч | $n$ , об/мин | Полное давление $H$ , мм вод. ст. | К. п. д. при $\frac{Q_{\text{max}}}{Q_{\text{опт}}}$ | Потребляемая мощность $N$ , кВт | Момент инерции ротора, кг·м² | Масса нетто, кг |
|---------------------------|---------------------------------------------------------|--------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------|------------------------------|-----------------|
| Д-11-15 Н <sub>30</sub>   | 190000                                                  | 730          | 210                               | 58/65                                                | 220                             | 216                          | 3880            |
| Д-11-15,5 Н <sub>30</sub> | 220000                                                  | 730          | 225                               | 58/65                                                | 280                             | 230                          | 3900            |
| Д-11-16 Н <sub>30</sub>   | 240000                                                  | 730          | 240                               | 58/65                                                | 330                             | 263                          | 3940            |
| Д-11-16,5 Н <sub>30</sub> | 270000                                                  | 730          | 250                               | 58/65                                                | 380                             | 276                          | 3920            |
| Д-11-17 Н <sub>30</sub>   | 290000                                                  | 730          | 270                               | 58/65                                                | 440                             | 295                          | 3940            |
| Д-11-17,5 Н <sub>30</sub> | 310000                                                  | 730          | 280                               | 58/65                                                | 490                             | 331                          | 4000            |
| Д-11-15 Н <sub>40</sub>   | 185000                                                  | 730          | 190                               | 58/65                                                | 185                             | 216                          | 3880            |
| Д-11-15,5 Н <sub>40</sub> | 205000                                                  | 730          | 205                               | 58/65                                                | 220                             | 230                          | 3900            |
| Д-11-16 Н <sub>40</sub>   | 225000                                                  | 730          | 220                               | 58/65                                                | 250                             | 263                          | 3940            |
| Д-11-16,5 Н <sub>40</sub> | 245000                                                  | 730          | 235                               | 58/65                                                | 280                             | 276                          | 3920            |
| Д-11-17 Н <sub>40</sub>   | 270000                                                  | 730          | 250                               | 58/65                                                | 340                             | 295                          | 3940            |
| Д-11-17,5 Н <sub>40</sub> | 290000                                                  | 730          | 265                               | 58/65                                                | 390                             | 331                          | 4000            |

Примечание. Технические данные указаны для температуры всасываемого воздуха (газа) 200°С.

Таблица X-5

Дымососы двустороннего всасывания типов Д-75, Д-100, Д-190 и Д-300

| Тип       | Производительность $Q$ , м³/ч | $n$ , об/мин | Полное давление $H$ , мм вод. ст. | Мощность электродвигателя $N$ , кВт | Момент инерции колеса, кг·м² | Температура всасываемого воздуха, °С | Масса нетто, кг |
|-----------|-------------------------------|--------------|-----------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|-----------------|
| Д-75/1200 | 75000                         | 1450         | 1240                              | 520                                 | 245                          | 80                                   | 4500            |
| Д-100/220 | 100000                        | 960          | 270                               | 155                                 | 58                           | 200                                  | 2890            |
| Д-190     | 260000                        | 960          | 435                               | 570                                 | 420                          | 200                                  | 9200            |
| Д-190     | 210000                        | 730          | 250                               | 260                                 | 420                          | 200                                  | 9200            |
| Д-190-1   | 230000                        | 960          | 290                               | 380                                 | 201                          | 200                                  | 9200            |
| Д-190-1   | 180000                        | 730          | 165                               | 165                                 | 201                          | 200                                  | 9200            |
| Д-190-2   | 240000                        | 960          | 375                               | 480                                 | 210                          | 200                                  | 9200            |
| Д-190-2   | 180000                        | 730          | 218                               | 240                                 | 210                          | 200                                  | 9200            |
| Д-300/400 | 310000                        | 730          | 425                               | 750                                 | 1671                         | 200                                  | 16300           |
| Д-300/400 | 260000                        | 580          | 270                               | 480                                 | 1671                         | 200                                  | 16300           |

Примечания: 1. Дымососы типов Д-190 и Д-300 поставляются комплектно с всасывающими карманами, бронеплитами, подшипниками, фундаментной рамой, встроенным направляющим аппаратом шибера типа с дистанционным ручным управлением, эластичной муфтой, но без электродвигателя.

2. Нагнетательная улитка дымососа Д-300/400 из-за больших габаритов поставляется узлами, окончательная сборка и сварка производится на монтажной площадке силами и средствами заказчика.

3. Дымосос Д-75/1200 поставляется с одним карманом.

Таблица X-6

## Котлы-утилизаторы, устанавливаемые за мартеновскими печами

| Марка   | Расчетные параметры за-<br>печ-<br>ных газов |                           | Расчетная провоз-димость (суммарная),<br>т/ч, при давлении, кН/м² |                                       |                                         |                                         | Температура перегрева пара,<br>°С, при давлении, кН/м² |                                       |                                         |                                         | Произво-<br>дитель-<br>ность ды-<br>моса,<br>тыс. м³/ч | Емкость<br>мартенов-<br>ской печи<br>т | Конструкция,<br>изготовитель |
|---------|----------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------|
|         | количество, м³/ч                             | темпе-<br>ра-<br>тура, °С | 4500                                                              |                                       | 1800                                    |                                         | 4500                                                   |                                       | 1800                                    |                                         |                                                        |                                        |                              |
|         |                                              |                           | с испаритель-<br>ным охлаж-<br>дением                             | с испаритель-<br>ным охлаж-<br>дением | без испаритель-<br>ного охлаж-<br>дения | без испаритель-<br>ного охлаж-<br>дения | с испаритель-<br>ным охлаж-<br>дением                  | с испаритель-<br>ным охлаж-<br>дением | без испаритель-<br>ного охлаж-<br>дения | без испаритель-<br>ного охлаж-<br>дения |                                                        |                                        |                              |
| КУ-100у | 100000/100000                                | 650/550                   | 29,3/19,4                                                         | 30,0/20,2                             | 21,6/—                                  | —                                       | 400/382                                                | 385/365                               | 390/—                                   | 230                                     | 500                                                    | ЦЭЧМ, ТКЗ                              |                              |
| КУ-80у  | 80000/60000                                  | 650/550                   | 25,2/17,0                                                         | 26,0/17,5                             | 17,3/—                                  | —                                       | 390/370                                                | 376/355                               | 380/—                                   | 190                                     | 370                                                    | ЦЭЧМ, ТКЗ                              |                              |
| КУ-60у  | 60000/45000                                  | 650/550                   | 20,3/13,9                                                         | 20,8/14,2                             | 12,9/—                                  | —                                       | 377/360                                                | 365/345                               | 372/—                                   | 150                                     | 250                                                    | ЦЭЧМ, ТКЗ                              |                              |
| КУ-80   | 77500/58000                                  | 650/550                   | —                                                                 | —                                     | 15,2/8,9                                | —                                       | —                                                      | —                                     | 375/367                                 | 190                                     | 370—500                                                | ЦЭЧМ, ТКЗ                              |                              |
| КУ-60   | 60000/42000                                  | 650/550                   | 11,4/6,6                                                          | —                                     | 11,4/6,6                                | —                                       | —                                                      | —                                     | 375/370                                 | 150                                     | 185—350                                                | СЗЭЧМ, ТКЗ                             |                              |
| КУ-50   | 50000/—                                      | 650/—                     | —                                                                 | —                                     | 9,5/—                                   | —                                       | —                                                      | —                                     | 375/—                                   | 120                                     | 90—185                                                 | Гипромет, ТКЗ                          |                              |
| КУ-40   | 40000/28000                                  | 600/600                   | —                                                                 | —                                     | 7,4/5,2                                 | —                                       | —                                                      | —                                     | 246/254                                 | 110                                     | 70—90                                                  | Гипромет, ТКЗ                          |                              |

Примечания: 1. В числителе даны параметры при максимальной нагрузке, в знаменателе — при средней нагрузке.

2. Котлы-утилизаторы КУ-100у, КУ-80у и КУ-60у предназначены для комбинированной работы с системой испарительного охлаждения мартеновских печей. По этим котлам дана общая выработка пара (от котла и испарительного охлаждения). Котлы остальных марок не рассчитаны на комбинированную работу с системой испарительного охлаждения.

3. Все котлы, за исключением КУ-40, змеевикового типа с многократной принудительной циркуляцией воды; котел КУ-40 — газогрубный.

4. ТКЗ и Гипрометом подготовлен выпуск котлов-утилизаторов КУ-30 и КУ-16 соответственно для мартеновских печей емкостью 50—70 и 30 т.

5. ЦЭЧМ, СЗЭЧМ и ТКЗ соответственно «Центроэнергочермет», «Севзаэнергочермет» и Таганрогский котлостроительный завод.

6. Котел КУ-40 в отличие от других рассчитан на работу с давлением пара 1300 кН/м<sup>2</sup>.

7. Паропроизводительности котлов КУ-50 и КУ-60 пересчитаны с расчетных данных, относящихся к другим температурам газов перед котлами.

## СТРУЙНОЕ ТЕЧЕНИЕ ГАЗОВ

### ИСТЕЧЕНИЕ ГАЗОВ ПРИ НИЗКОМ ДАВЛЕНИИ

Истечение газов через отверстия, насадки и сопла в атмосферу при низких давлениях, порядка до 10 кН/м<sup>2</sup> (1000 мм вод. ст.), когда можно пренебречь изменением объема от изменения давления, рассчитывают по следующим формулам:

$$\omega = \sqrt{\frac{2(P-P_0)}{\rho}} \text{ м/с; } V = \varphi \cdot F \sqrt{\frac{2h}{\rho}} \text{ м}^3/\text{с;}$$

$$G = \varphi \cdot F \sqrt{2h\rho} \text{ кг/с,}$$

где  $\varphi$  — коэффициент сжатия струи.

Для отверстия с острыми кромками  $\varphi=0,62$ ; для цилиндрического насадка  $\varphi=0,85$ , при закругленном входе в насадку  $\varphi=1$ .

Для диффузора с плавным входом за расчетную площадь  $F$  принять площадь выходного сечения.

Расход через открытое окно из печи

$$V_t = \frac{2}{3} F \sqrt{\frac{2h_{\text{геом}}}{\rho_t}},$$

где  $\rho_t$  — плотность продуктов сгорания при температуре  $t$ , °С;

$h_{\text{геом}}$  — геометрическое давление в верхней плоскости окна, Н/м<sup>2</sup>.

### ИСТЕЧЕНИЕ ГАЗОВ ПРИ ВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ

Процесс теоретического адиабатного истечения газа из резервуара под давлением  $P_1$  и при начальной энтальпии  $i_1$ , кДж/кг, в окружающую среду (атмосферу), характеризуемую давлением  $P$  и энтальпией  $i$  газа в конце процесса, описывается следующими формулами:

а. Критическое отношение давлений  $\nu_{\text{кр}} < \frac{P}{P_1}$ , дозвуковое истечение:

$$\omega = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} P_1 v_1 \left[ 1 - \left( \frac{P}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} = 44,7 \sqrt{i_1 - i} \text{ м/с;}$$

$$G = F \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \frac{P_1}{v_1} \left[ \left( \frac{P}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{P}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} = F \frac{44,7 \sqrt{i_1 - i}}{\nu} \text{ кг/с.}$$

б. Критическое отношение давлений  $\nu_{\text{кр}} \geq \frac{P}{P_1}$ :

$$\omega_{\text{кр}} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} P_1 v_1} = 44,7 \sqrt{i_1 - i_{\text{кр}}} \text{ м/с;}$$

$$G_{\text{max}} = F \sqrt{2 \frac{k}{k+1} \frac{P_1}{v_1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}} \text{ кг/с;}$$

$$\frac{T_1}{T} = \left( \frac{P_1}{P} \right)^{\frac{k-1}{k}}; \quad P_{\text{кр}} = P_1 \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}.$$

Таблица XI-1

Значения газовой постоянной  $R$  и показателя степени адиабаты  $k$ 

| Газ                                 | $R$ ,<br>Дж/(кг·°С) | Показатель степени адиабаты $k$ при температурах $t$ , °С |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |  |
|-------------------------------------|---------------------|-----------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|--|
|                                     |                     | 0                                                         | 100   | 200   | 300   | 400   | 500   | 600   | 700   | 800   | 900   | 1000  | 1100  | 1200 |  |
| Воздух . . . . .                    | 288                 | 1,4                                                       | 1,395 | 1,39  | 1,38  | 1,365 | 1,36  | 1,34  | 1,334 | 1,33  | 1,32  | 1,32  | 1,316 | 1,3  |  |
| Оксид углерода . . . . .            | 298                 | 1,4                                                       | 1,396 | 1,39  | 1,38  | 1,37  | 1,35  | 1,344 | 1,335 | 1,33  | 1,32  | 1,32  | 1,315 | 1,31 |  |
| Водород . . . . .                   | 4125                | 1,41                                                      | 1,4   | 1,4   | 1,393 | 1,39  | 1,39  | 1,39  | 1,385 | 1,375 | 1,37  | 1,365 | 1,36  | 1,35 |  |
| Метан . . . . .                     | 520                 | 1,3                                                       | 1,27  | 1,23  | 1,194 | 1,17  | 1,16  | 1,14  | 1,13  | 1,12  | 1,15  | 1,11  | 1,11  | 1,1  |  |
| Этан . . . . .                      | 278                 | 1,2                                                       | 1,15  | 1,25  | 1,11  | 1,095 | 1,09  | 1,08  | 1,07  | 1,07  | 1,065 | 1,065 | 1,06  | 1,06 |  |
| Пропан . . . . .                    | 188                 | 1,14                                                      | 1,10  | 1,08  | 1,07  | 1,065 | 1,06  | 1,05  | 1,05  | 1,05  | 1,05  | 1,045 | 1,04  | 1,03 |  |
| Бутан . . . . .                     | 143                 | 1,1                                                       | 1,075 | 1,06  | 1,05  | 1,048 | 1,044 | 1,04  | 1,038 | 1,038 | 1,036 | 1,032 | 1,03  | 1,03 |  |
| Этилен . . . . .                    | 298                 | 1,26                                                      | 1,20  | 1,16  | 1,14  | 1,12  | 1,11  | 1,105 | 1,10  | 1,094 | 1,09  | 1,09  | 1,085 | 1,08 |  |
| Ацетилен . . . . .                  | 320                 | 1,25                                                      | 1,21  | 1,185 | 1,17  | 1,17  | 1,16  | 1,15  | 1,144 | 1,14  | 1,134 | 1,13  | 1,13  | 1,13 |  |
| Шебелинский природный газ . . . . . | 475                 | 1,3                                                       | 1,27  | 1,23  | 1,19  | 1,17  | 1,16  | 1,14  | 1,13  | 1,12  | 1,12  | 1,11  | 1,11  | 1,1  |  |
| Елшанский природный газ . . . . .   | 476                 | 1,31                                                      | 1,29  | 1,22  | 1,19  | 1,17  | 1,15  | 1,14  | 1,13  | 1,13  | 1,11  | 1,11  | 1,11  | 1,1  |  |
| Изербашский природный газ . . . . . | —                   | 1,25                                                      | 1,21  | 1,17  | 1,15  | 1,13  | 1,12  | 1,11  | 1,11  | 1,1   | 1,1   | 1,09  | —     | —    |  |
| Доменный газ . . . . .              | 294                 | 1,39                                                      | 1,38  | 1,36  | 1,35  | 1,34  | 1,33  | 1,32  | 1,31  | 1,3   | 1,3   | 1,29  | —     | —    |  |
| Азот . . . . .                      | 298                 | 1,4                                                       | 1,4   | 1,39  | 1,38  | 1,37  | 1,36  | 1,35  | 1,34  | 1,33  | 1,325 | 1,32  | 1,32  | 1,31 |  |
| Кислород . . . . .                  | 260                 | 1,4                                                       | 1,39  | 1,37  | 1,35  | 1,35  | 1,34  | 1,32  | 1,31  | 1,31  | 1,30  | 1,3   | 1,3   | 1,3  |  |
| Водяной пар (перегретый) . . . . .  | 462                 | 1,33                                                      | 1,33  | 1,32  | 1,30  | 1,29  | 1,275 | 1,265 | 1,255 | 1,254 | 1,24  | 1,23  | 1,22  | 1,22 |  |

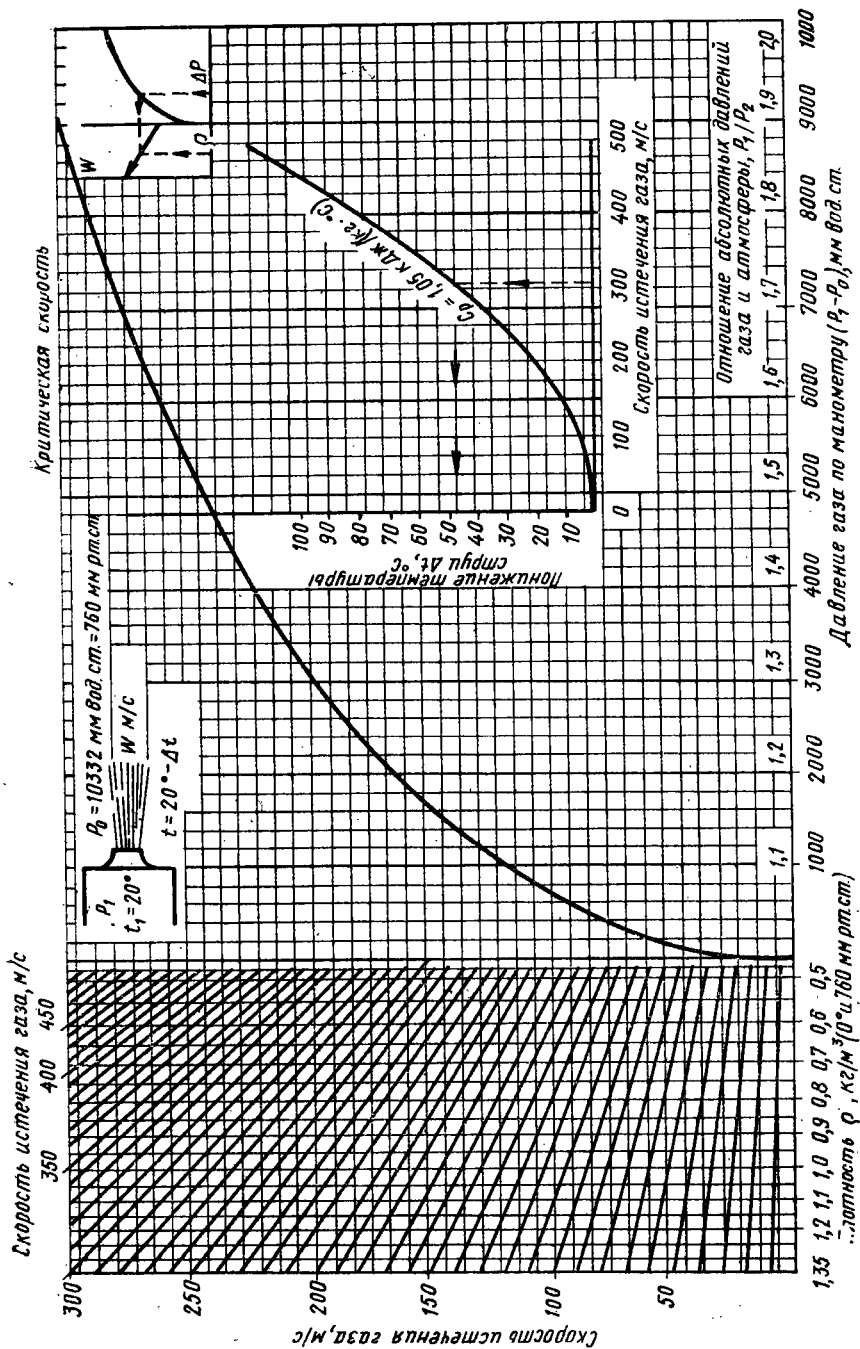


Рис. 134. Скорость истечения газов при больших давлениях

Для двухатомных газов при  $k=1,4$  значение  $P_{кр}=0,528 P_1$ ; для сухого насыщенного пара  $k=1,135$ ;  $P_{кр}=0,577 P_1$ ; для перегретого пара  $k=1,33$  значение  $P_{кр}=0,546 P_1$ ; для трех- и многоатомных газов  $k=1,29$ ,  $P_{кр}=0,548 P_1$ .

Приведенные формулы справедливы, если можно пренебречь потерями давления на трение при вытекании газа через отверстие.

Для определения действительной скорости истечения газа необходимо вводить поправку на трение — коэффициент скорости  $\alpha=0,96-0,97$ . При определении действительного расхода необходимо вводить в формулу коэффициент сжатия струи  $\varphi < 1$ . Произведение  $\varphi \alpha$  именуют коэффициентом расхода  $\mu$ . Тогда  $G = \mu F w_p$ , где

$$\mu = 0,87 - 0,25 \frac{P}{P_1}; \quad 0,62 < \mu < 0,87.$$

Для случая истечения газа в атмосферу с давлением  $P_0 = 1 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$  (1 ата) скорость может быть определена по номограмме рис. 134 для различных плотностей газов.

## ИСТЕЧЕНИЕ ГАЗОВ ЧЕРЕЗ СОПЛО ЛАВАЛЯ

Истечение газов и паров с  $P_{нач} > P_{кр}$  через сопло Лавalia приводит к получению скоростей движения, превышающих критическую скорость истечения. Ниже даны выражения, необходимые для расчета параметров сопла Лавalia. Начальные параметры газа обозначены индексом 1, конечные — без индекса и текущие (промежуточные) — индексом  $l$ ;  $w_{max}$  — предельное значение скорости истечения газа при полном использовании внутреннего запаса энергии:

$$\begin{aligned} v_1 &= \frac{RT_1}{P_1}; \quad w_{max} = \sqrt{\frac{k}{k-1} 2RT_1}; \\ \frac{P_l}{P_1} &= \left(\frac{T_l}{T_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}; \quad F_l = \frac{G \cdot V_l}{w_l}; \\ w_l &= \sqrt{\frac{k}{k-1} 2RT_1 \left(1 - \frac{T_l}{T_1}\right)}; \quad d_l = \sqrt{\frac{4G}{\pi \rho_l w_l}}; \\ l &= \frac{w_{max}}{b} \left( \ln \frac{1 + \frac{w_l}{w_{max}}}{1 - \frac{w_l}{w_{max}}} - 2 \frac{w_l}{w_{max}} \right), \end{aligned}$$

$$\beta_{кр} \cdot P_1 = \gamma_{кр} \cdot P_1 = P_{кр} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} P_1; \quad T_{кр} = \frac{2}{k+1} T_1;$$

$$v_{кр} = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} v_1; \quad w_{кр} = \sqrt{\frac{k}{k-1} 2R(T_1 - T_{кр})};$$

$$F_{min} = \frac{G \cdot v_{кр}}{w_{кр}}.$$

Для получения сопла Лавalia с углом раскрытия порядка  $10^\circ$  принимают  $b \approx 5000$ . Задавая значение  $T_l$  и отношение  $T_l/T_1$ , находят параметры сопла  $l$ ,  $P_l$ ,  $v_l$ ,  $w_l$ ,  $F_l$ ,  $d_l$ . Проведя несколько таких последовательных расчетов, получают необходимые данные для построения продольного профиля сопла Лавalia.

Теоретический профиль сопла Лавала имеет переменный угол раскрытия, постепенно увеличивающийся в области низких давлений.

Расчет конического сопла Лавала можно также выполнить с помощью газодинамических функций, представленных для различных газов (отличающихся величиной  $k$ ) на рис. 135. Значения функций даны в зависимости от величины  $\lambda$ , которая представляет собой относительную скорость потока  $\lambda = w/w_{кр}$ . Она изменяется от  $\lambda=0$  в начале сопла до  $\lambda=1$  в критическом сечении, когда скорость течения потока достигает значения, равного скорости звука, и затем превышает ее в расширяющейся части насадка, где  $\lambda > 1$ .

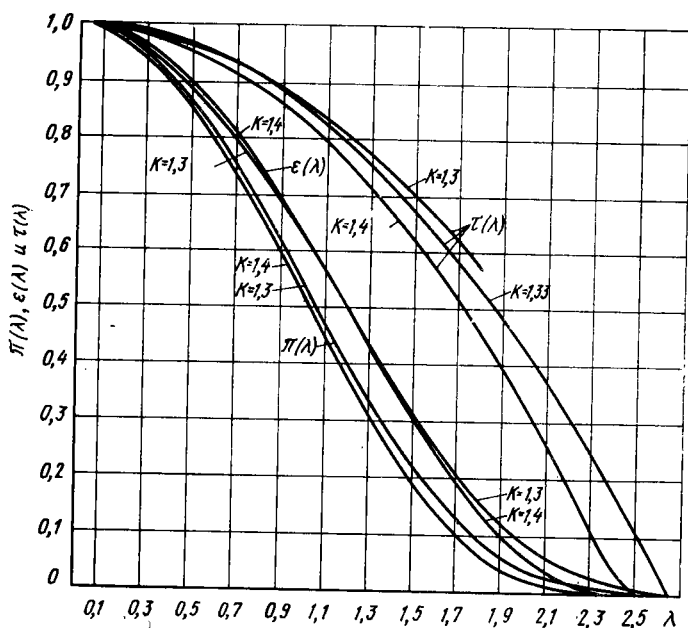


Рис. 135. Газодинамические функции

Текущие параметры потока  $T_l$ ,  $\rho_l$  или  $v_l$ ,  $P_l$ ,  $w_l$  определяются через газодинамические функции

$$w_l = \lambda \cdot w_{кр} \text{ м/с}; \quad \frac{w_l}{w_{кр}} = \lambda = \sqrt{\frac{k+1}{k-1} [1 - \pi(\lambda)^{\frac{k-1}{k}}]};$$

$$P_l = P_1 \pi(\lambda) \text{ Н/м}^2; \quad \frac{P_l}{P_1} = \pi(\lambda) = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{k}{k-1}};$$

$$\rho_l = \rho_1 \cdot \epsilon(\lambda) \text{ кг/м}^3; \quad \frac{\rho_l}{\rho_1} = \epsilon(\lambda) = \pi(\lambda)^{\frac{1}{k}};$$

$$T_l = T_1 \cdot \tau(\lambda) \text{ К}; \quad \frac{T_l}{T_1} = \tau(\lambda) = \pi(\lambda)^{\frac{k-1}{k}}.$$

Задавая  $\lambda=1$ , находят параметры потока в критическом сечении и определяют площадь критического сечения  $F_{кр}$  по формуле

$$F_{кр} = \frac{G \cdot \sqrt{T_1}}{k_r \cdot P_1} \text{ мм}^2,$$

где  $G$  — расход газа, кг/с;  
 $P_1$  — давление газа перед соплом, МН/м<sup>2</sup>;  
 $T_1$  — температура газа перед соплом, К;

$$k_r = V \sqrt{\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \frac{k}{R}}, \quad ^\circ\text{C}^{1/2} \cdot \text{с/м},$$

$R$  — газовая постоянная, Н·м/(кг·°С), Дж/(кг·°С).

Далее, принимая для расчетного режима  $P_1 = 0,0981$  МН/м<sup>2</sup>, определяют  $\pi(\lambda)$  и все остальные параметры струи. Площадь выходного сечения сопла находится из выражения

$$F_{\text{вых}} = \frac{G \cdot 10^6}{\omega \cdot \rho} \text{ мм}^2.$$

Длина сопла определяется по предельному углу раскрытия сопла  $\alpha \approx 12^\circ$ .

Таблица XI-2

Термодинамические характеристики газов

| Газ                                          | $k = c_p / c_v$ | $\gamma_{\text{кр}} = \beta_{\text{кр}}$ | $P_1 = P_{\text{кр}}^{\gamma_{\text{кр}}}$<br>МН/м <sup>2</sup> | $R$ ,<br>Дж/(кг·°С) | $k_r$ ,<br>°C <sup>1/2</sup> ·с/м |
|----------------------------------------------|-----------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------|-----------------------------------|
| Компрессорный воз-<br>дух . . . . .          | 1,40            | 0,528                                    | 0,186                                                           | 287                 | 0,0404                            |
| Кислород . . . . .                           | 1,40            | 0,528                                    | 0,186                                                           | 260                 | 0,0425                            |
| Перегретый пар . . . .                       | 1,33            | 0,540                                    | 0,181                                                           | 462                 | 0,0313                            |
| Природный газ . . . .                        | 1,31            | 0,545                                    | 0,180                                                           | 475—491             | 0,0304                            |
| Продукты сгорания<br>природного газа . . . . | 1,30            | 0,547                                    | 0,180                                                           | 289                 | 0,0393                            |

## АЭРОДИНАМИКА СТРУИ

В гидравлике принято струю капельной жидкости, окруженную газом, считать затопленной, а струю, окруженную жидкостью, примерно той же плотности — затопленной. Кроме того, выделяют особо два класса движений: свободные, происходящие вдалеке от твердых поверхностей и подчиняющиеся закономерностям так называемой «свободной турбулентности», и пристеночные, в отличие от предыдущих развивающиеся вблизи твердых поверхностей и описываемые закономерностями «пристеночной турбулентности».

Схема свободной турбулентной затопленной струи приведена на рис. 136.

Для начального сечения  $F_0$  при истечении газа с осевой скоростью  $\omega_0$  среднюю скорость  $\omega_{0\text{ср}}$ , расход  $V_0$ , количество движения  $I_0$  и кинетическую энергию  $E_0$  определяют из следующих выражений:

$$\omega_{0\text{ср}} = k_{01} \omega_0 \text{ м/с}; \quad V_0 = F_0 k_{01} \omega_0 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$G_0 = F_0 \rho_0 k_{01} \omega_0 \text{ кг/с}; \quad I_0 = \rho_0 F_0 k_{01} \omega_0 k_{02} \omega_0 \text{ Н}; \quad \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2};$$

$$E_0 = \frac{\rho_0}{2} F_0 k_{01} \omega_0 k_{02} \omega_0 k_{03} \omega_0 \text{ Дж/с}; \quad \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^3}; \quad \text{Вт};$$

где  $\rho_0$  — плотность истекающего газа.

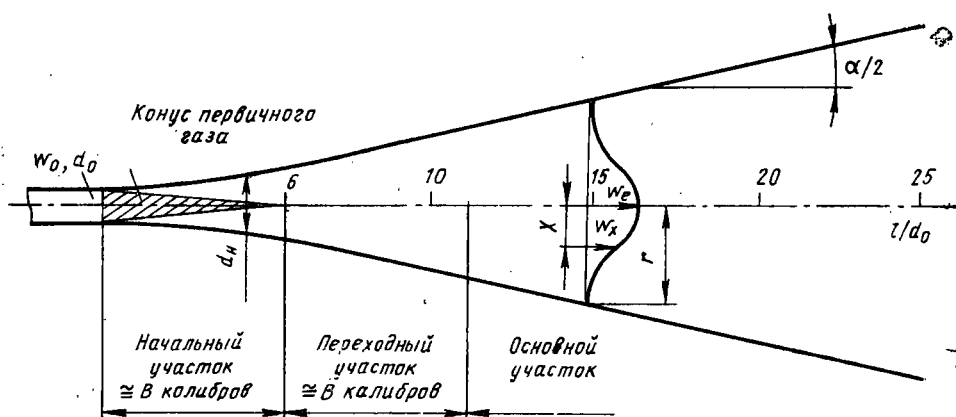


Рис. 136. Схема свободной струи

Значения коэффициентов усреднения скорости при определении расхода  $k_{01}$ , количества движения  $k_{02}$  и кинетической энергии  $k_{03}$  для трубы круглого сечения в зависимости от числа  $Re$  приведены на рис. 137.

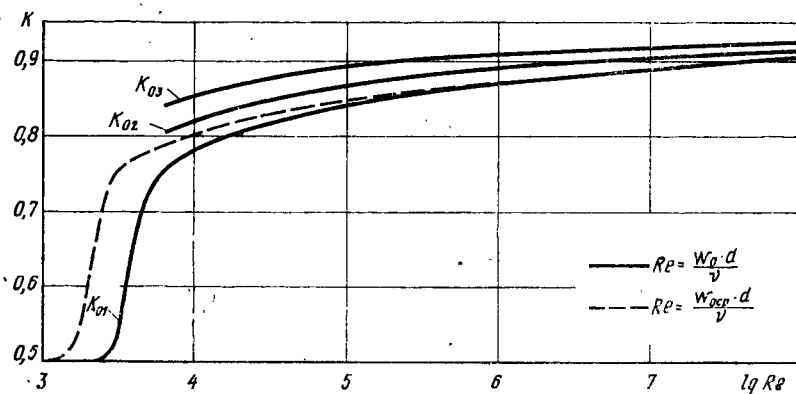


Рис. 137. Зависимость усредняющих коэффициентов  $k_{01}$ ,  $k_{02}$ ,  $k_{03}$  от числа Рейнольдса для круглой трубы

Для поперечного сечения в области основного участка струи при  $l \gg 6$  справедливы следующие соотношения:

$$\omega_l = \omega_0 \frac{d_0}{l} B; \quad B = \sqrt{\frac{k_{01} k_{02} \rho_0}{k_1 k_2 \rho_{cm} b^2}} = 5,6 \div 6;$$

$$b^2 = 0,44 \frac{k_{01} - 0,5}{k_{01}}; \quad d_l = b \cdot l;$$

$$b = 2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}; \quad \omega_x = \omega_l \left[ 1 - \left( \frac{x}{r} \right)^2 \right]^2;$$

$$G_l = \frac{G_0 k_{02} l}{B k_2 d_0} \approx 0,316 \frac{l}{d_0} G_0;$$

$$V_l = \frac{V_0 \rho_0 k_{02} l}{B \rho_l k_2 d_0}; \quad I_l = I_0;$$

$$E_l = \frac{G_0 k_{02} k_3 \omega_0^2}{2} \cdot \frac{d_0}{l} \cdot B = I_0 \omega_0 \frac{k_3}{2} \frac{d_0}{l} B,$$

где  $k_1=0,26$ ;  $k_2=0,51$ ;  $k_3=0,66$  и не зависят от  $Re$ . Угол раскрытия струи  $18^\circ < \alpha < 26,5^\circ$ ; практически  $\alpha = 22 \div 24^\circ$ .

Для поперечного сечения в области начального участка струи при  $l < 6$  следует пользоваться следующими формулами:

$$\omega_{\text{ось н}} = \omega_0; \quad G_{\text{н}} = G_0 \sqrt{1 + \frac{b^2 k_1 k_{02} \rho l}{k_{01} k_2 \rho_0} \left(\frac{l}{d_0}\right)^2};$$

$$d_{\text{н}} = d_0 \sqrt{1 + b^2 \left(\frac{l}{d_0}\right)^2}.$$

Индексы: 0 — выходное сечение насадки;  $l$  — параметры поперечного сечения струи на расстоянии  $l$  от выходного сечения;  $x$  — расстояние  $x$  от оси поперечного сечения; «н» — начальный участок струи.

Струи, истекающие из насадков квадратного и прямоугольного сечений, в дальнейшем превращаются в круглую струю. Для квадратного насадка этот процесс заканчивается на  $L \approx 6 d_0$ , а для прямоугольного — в зависимости от соотношения сторон; так,  $L = 19 d_0$  при соотношении сторон прямоугольника, равном 1,7. При расчетах можно пользоваться закономерностями круглой струи, введя эквивалентную замену и исходя из условия равенства количества движения струи круглого и прямоугольного сечений.

## СТРУЙНЫЕ АППАРАТЫ

Струйные аппараты предназначены для нагнетания либо для удаления газов или паров. Аппарат называется инжектором, если его основной задачей является нагнетание смешанного потока в пространство за камерой смешения. Если аппарат предназначен для создания разрежения перед камерой смешения, его называют эжектором. В качестве рабочей среды в струйных аппаратах можно применять либо газы (сжатый воздух, природный газ, водяной пар и др.), либо жидкости (вода и др.). Схема струйного аппарата показана на рис. 138.

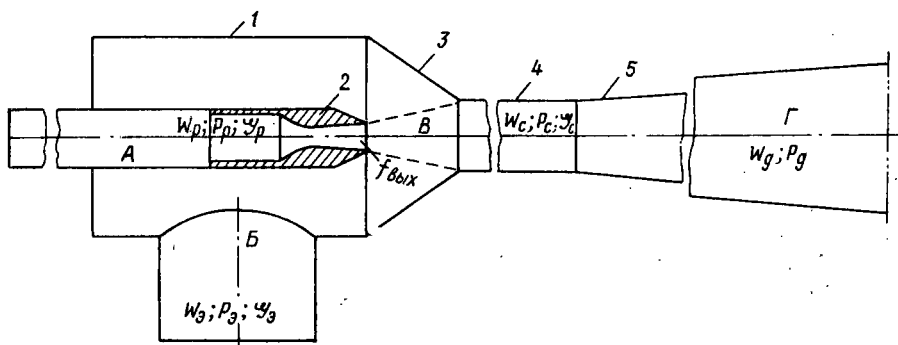


Рис. 138. Схема струйного аппарата

1 — приемная камера; 2 — рабочее сопло; 3 — входной участок камеры; 4 — камера смешения; 5 — диффузор; А — рабочая среда; Б — эжектируемая среда; В — свободная струя; Г — смешанный поток

Установка диффузора на выходе смешанного потока резко увеличивает общий к. п. д. струйного прибора.

Поставленные у букв индексы «р», «э», «с», «д» относятся соответственно к параметрам потоков: рабочего, эжектируемого, смешанного и в диффузоре.

Оптимальные значения действительных скоростей истечения  $w_p$  и  $w_c$  определяют из выражений:

$$w_{p, \text{ опт}} = w_3 \frac{G_3}{G_p} \frac{1}{(2 - \eta_d) \left(1 + \frac{G_3}{G_p}\right) \left(\frac{\rho_3}{\rho_p} + \frac{G_3}{G_p}\right) - \left(\frac{G_3}{G_p}\right)^2} =$$

$$= \frac{w_3 U}{(2 - \eta_d) (1 + U) \left(\frac{\rho_3}{\rho_p} + U\right) - U^2};$$

$$w_{c, \text{ опт}} = \frac{w_3 \left(\frac{\rho_3}{\rho_p} + \frac{G_3}{G_p}\right)}{(2 - \eta_d) \left(1 + \frac{G_3}{G_p}\right) \left(\frac{\rho_3}{\rho_p} + \frac{G_3}{G_p}\right) - \left(\frac{G_3}{G_p}\right)^2} =$$

$$= \frac{w_3 \left(\frac{\rho_3}{\rho_p} + U\right)}{(2 - \eta_d) (1 + U) \left(\frac{\rho_3}{\rho_p} + U\right) - U^2},$$

где  $\eta_d$  — коэффициент полезного действия диффузора, равный 0,8—0,85;

$U = \frac{G_3}{G_p} = \frac{V_3}{V_p} \cdot \frac{\rho_3}{\rho_p}$  — коэффициент инжекции.

При равенстве плотностей рабочей и эжектируемой сред ( $\rho_p = \rho_3$ ) уравнения упрощаются:

$$w_{p, \text{ опт}} = \frac{w_3 U}{(2 - \eta_d) (1 + U)^2 - U^2};$$

$$w_{c, \text{ опт}} = \frac{w_3 (1 + U)}{(2 - \eta_d) (1 + U)^2 - U^2}.$$

Давление, которое должен преодолеть инжектор, определяется следующим образом:

$$\Delta P = (P_d - P_3) + (1 + \zeta_3) \frac{\rho_3 w_p^2}{2},$$

где  $\zeta_3$  — коэффициент сопротивления, учитывающий потери давления при прохождении эжектируемой среды до смесителя.

С другой стороны, из теории инжекции противодавление определяется:

$$\Delta P = \frac{\rho_c [G_p w_3 w_c + G_3 w_p w_c - (G_p + G_3) w_c^2]}{(G_p + G_3)} + \eta_d \frac{\rho_c (w_c^2 - w_d^2)}{2}.$$

В качестве вспомогательного уравнения для определения недостающих величин можно использовать основное уравнение энергетического баланса струйного прибора:

$$\frac{G_p w_p^2}{2} + \frac{G_3 w_3^2}{2} = (G_p + G_3) \frac{w_d^2}{2} + \left(\frac{G_p}{\rho_p} + \frac{G_3}{\rho_3}\right) (P_d - P_3) + G_p \frac{(w_p - w_c)^2}{2} +$$

$$+ G_3 \frac{(w_3 - w_c)^2}{2} + (G_p + G_3) \frac{(w_c^2 - w_d^2)}{2} (1 - \eta_d).$$

Геометрические параметры струйного прибора выбирают исходя из условия получения наименьших потерь энергии на основании приведенных в настоящем разделе данных по аэродинамике струи, истечению га-

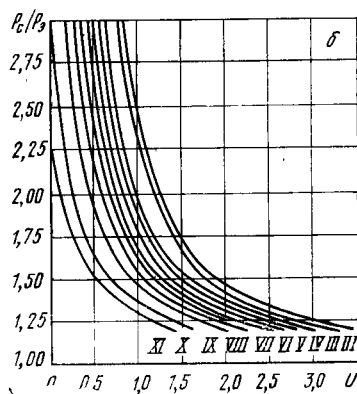
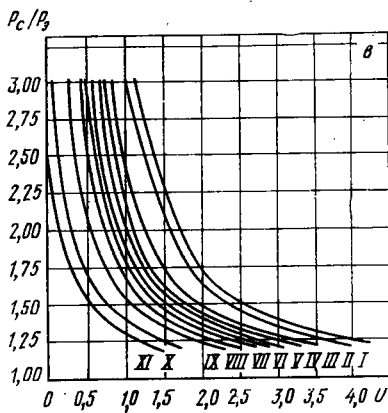
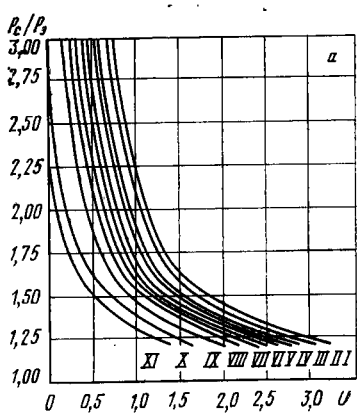


Рис. 139. Зависимость расчетного коэффициента инжекции  $U$  струйного компрессора от расчетной степени сжатия  $P_c/P_3$  и от располагаемой степени расширения  $P_p/P_3$ :

$a$  — двухатомный газ,  $k=1.4$ ;  $б$  — перегретый водяной пар,  $k=1.3$ ;  $в$  — сухой насыщенный пар,  $k=1.13$

|              |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |     |  |
|--------------|----|----|----|----|----|----|----|---|---|---|-----|--|
| Номер кривой |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |     |  |
| $P_p/P_3$    | 75 | 50 | 25 | 20 | 15 | 12 | 10 | 8 | 6 | 4 | 3.2 |  |

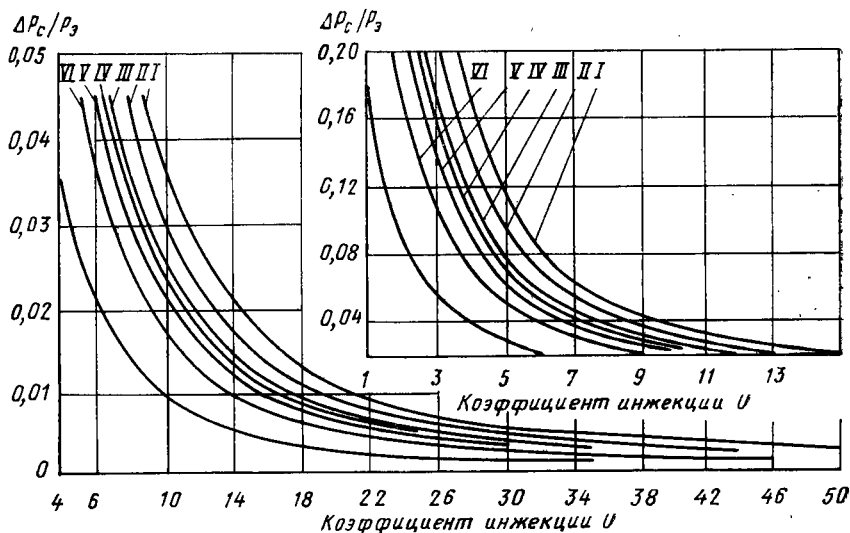


Рис. 140. Зависимость  $\frac{\Delta P_c}{P_3} = f(U)$  для инжекторов

|              |    |   |    |   |   |   |   |
|--------------|----|---|----|---|---|---|---|
| Номер кривой |    |   |    |   |   |   |   |
| $P_p/P_3$    | 50 | 0 | 10 | 3 | 6 | 4 | 2 |

зов из отверстий и коэффициентов местных сопротивлений. Длину цилиндрической части инжектора принимают равной 3—6 диаметрам.

При большой степени расширения рабочей среды  $\left(\frac{P_p}{P_3} > 2\right)$  рекомендуется расчетный массовый коэффициент инжекции  $U = G_3/G_p$  определять по рис. 139 в зависимости от располагаемой степени расширения рабочей среды  $P_p/P_3$  и расчетной степени сжатия  $P_c/P_3$  либо по рис. 140 в зависимости от значений

$$\frac{\Delta P_c}{P_3} = \frac{P_c - P_3}{P_3} \text{ и } \frac{P_p}{P_3}.$$

Графики построены при условии равенства температур рабочей  $t_p$  и эжектируемой  $t_3$  сред; если  $t_p > t_3$ , то коэффициент инжекции немного возрастает:

$$U_t = U \sqrt{T_p/T_3}.$$

Другие необходимые параметры определяют из следующих выражений:

$$\omega_{p. \text{кр}} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1}} \sqrt{P_p v_p}; \quad \omega_{3. \text{кр}} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1}} \sqrt{P_3 v_3};$$

$$\omega_{д. \text{кр}} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1}} \sqrt{P_d v_d}; \quad F_{p. \text{кр}} = \frac{G_p}{A} \sqrt{\frac{v_p}{P_p}};$$

$$F_{p. \text{вых}} = F_{p. \text{кр}} B \frac{1}{\left(\frac{P_3}{P_p}\right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{1 - \left(\frac{P_3}{P_p}\right)^{\frac{k-1}{k}}}};$$

$$F_c = F_{p. \text{кр}} B (1 + U) \frac{\omega_{д. \text{кр}}}{\omega_{p. \text{кр}}} \frac{P_p}{P_d} \frac{1}{\left(\frac{P_c}{P_d}\right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{1 - \left(\frac{P_c}{P_d}\right)^{\frac{k-1}{k}}}},$$

где

$$A = \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}; \quad B = \sqrt{\frac{k-1}{2} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}.$$

Для сухого насыщенного пара  $k=1,13$ ;  $\frac{1}{k}=0,885$ ;  $A=0,635$ ;  $B=0,151$ .

Для перегретого пара  $k=1,3$ ;  $\frac{1}{k}=0,77$ ;  $A=0,667$ ;  $B=0,226$ .

Для двухатомных газов  $k=1,4$ ;  $\frac{1}{k}=0,714$ ;  $A=0,682$ ;  $B=0,258$ .

Длину цилиндрической части принимают равной 6—10 диаметрам. Расстояние рабочего сопла от камеры смешения определяют из формул по аэродинамике свободной струи, рабочее сопло и диффузор — на основании изложенных выше соображений.

## ФАКЕЛ ПЛАМЕНИ

Сжигание газообразного топлива либо распыленного жидкого или твердого топлива в кислородсодержащей атмосфере приводит к образованию факела пламени. Видимый факел представляет собой горящий светящийся поток раскаленных газов. Факел имеет определенную геометрическую форму и размеры, которые должны быть увязаны с размера-

ми рабочего или топочного пространства печи. Несоответствие этих параметров приводит к снижению к. п. д. установки, ухудшению стойкости огнеупорных материалов, загрязнению окружающей среды и другим нежелательным последствиям.

Наиболее изученным является факел, развивающийся в условиях свободной струи. Уравнение для расчета длины свободного турбулентного факела  $L_{\phi}$ , полученное Авериним С. И. и Семикиным И. Д., имеет следующий вид:

$$L_{\phi} = d_0 \left[ N_0 (1 + \omega) - \frac{1}{b_0} \right] \sqrt{\frac{\rho_r}{\rho_{cm} \left[ 1 + I_B + Eu + f(\omega) f_1(\rho) \frac{z^3}{Pr} \right]}}$$

где  $L = L_{\phi}/d_0$  — безразмерная длина факела, выраженная в калибрах, диаметрах газового сопла  $d_0$ ;

$N_0$  и  $b_0$  — постоянные турбулентной струи, соответственно равные 11,2 и 0,47;  $1/b_0 = 2,14$ ;

$\omega$  — стехиометрическое число, показывающее количество килограммов воздуха, необходимое для сжигания 1 кг газа по стехиометрическому расчету процесса горения, кг/кг;

$\omega = \frac{L_{\text{теор}} \rho_{0,в}}{\rho_{0,г}}$ . Здесь  $L_{\text{теор}}$  — объем воздуха, м<sup>3</sup>, теоретически необходимый для сжигания 1 м<sup>3</sup> топлива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$\rho_{0,в}$  и  $\rho_{0,г}$  — соответственно плотности воздуха и газа при нормальных условиях, кг/м<sup>3</sup>;

$f(\omega)$  — безразмерная функция от стехиометрического числа  $\omega$ ; при расчетах может быть принято  $f(\omega) = 14,8 \cdot 10^{-4}$ ;

$f_1(\rho)$  — безразмерная функция характеристических плотностей;

$f_1(\rho) = \frac{\rho_v}{\rho_r} \left( \frac{\rho_v}{\rho_{cm}} - 1 \right)$ . Здесь  $\rho_v$  и  $\rho_r$  — плотности воздуха и газа соответственно, кг/м<sup>3</sup>;

Плотность газа при низком избыточном давлении можно найти из уравнения  $\rho_r = P/R \cdot T$ . При  $\omega_r \leq 0,4$   $\omega_{кр}$  изменением плотности газа при истечении можно пренебречь, рассматривая газ как несжимаемую жидкость.

При дозвуковых скоростях истечения

$$\rho_r = \frac{P_{\text{окр}}}{R \cdot T \cdot 2} \left( 1 + \sqrt{1 + (k^2 - 1) \left( \frac{G}{G_{кр}^0} \right)^2} \right)$$

При истечении газа с критическими скоростями

$$\rho_r = \frac{P_{кр}}{R \cdot T} \cdot \frac{k + 1}{2},$$

где  $G$  — расход массы газа через сопло, кг/с;

$G_{кр}^0$  — секундный расход массы газа, который соответствует моменту становления критической скорости истечения, когда статическое давление в струе истекающего газа еще равно давлению в окружающей среде, а скорость истечения уже равна критической:

$$G_{кр}^0 = \omega_{кр} F_0 \rho_{кр}^0;$$

$$\rho_{кр}^0 = \frac{P_{\text{окр}}}{R T} \cdot \frac{k + 1}{2};$$

$\rho_{cm}$  — плотность продуктов неполного сгорания в конце пути захвата стехиометрического количества воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Эту величину определяют по выражению

$$P_{\text{см}} = P_r \frac{\left[ N_0 (1 + \omega) - \frac{1}{b_0} \right]^2}{(\sigma P)^2},$$

где  $\sigma$  — постоянная, равная 0,48 (для  $Q_n^p$  в ккал/кг  $\sigma_1=0,98$ );  
 $P$  — комплексный параметр, определяемый по формуле

$$P = \sqrt{i_{\text{п.г}} \omega P_r}.$$

Здесь  $i_{\text{п.г}}$  — calorиметрическая энтальпия продуктов сгорания, образующихся при полном сжигании 1 кг газа, кДж/кг.

$$i_{\text{п.г}} = Q_n^p + i_r + \omega i_b \text{ кДж/кг.}$$

Значения комплексного параметра  $P$  при истечении газа с дозвуковой скоростью в спокойный воздух при  $t_r = t_b = 20^\circ\text{C}$ , для некоторых газов приведены в табл. XI-3.

Таблица XI-3

Значения комплексного параметра  $P$

| Газ                                 | $Q_n^p$ , кДж/кг | Значения $P$ | Газ                  | $Q_n^p$ , кДж/кг | Значения $P$ |
|-------------------------------------|------------------|--------------|----------------------|------------------|--------------|
| Доменный (ДГ)                       | 3310             | 27,6         | Водород              | 120500           | 286          |
| Генераторный                        | 6000             | 49,2         | Московский городской |                  |              |
| 50% $\text{H}_2$ + 50% $\text{N}_2$ | 8090             | 52,0         | Метан                | 44450            | 310          |
| Оксид углерода                      | 10230            | 82,5         | Шебелинский          | 48200            | 369          |
| 50% ДГ + 50% КГ                     | 11560            | 86,5         | Этан                 | 47350            | 470          |
| 50% СО + 50% $\text{H}_2$           | 17600            | 108,0        | Пропан               | 46500            | 540          |
| Коксовый (КГ)                       | 33300            | 188,0        | Бутан                | 46150            | 630          |

Параметр  $P$  показывает направление изменения длины факела при переходе от одного газа к другому. Чем больше величина  $P$ , тем длиннее факел при прочих равных условиях.

В приведенных выше формулах приняты следующие обозначения:

$I_b$  — относительное количество движения, которое вносит в струю газа воздух на пути захвата.

$$I_b = \frac{G_b w_b}{G_r w_r} = \omega \frac{w_b}{w_r},$$

где  $G_b$  — стехиометрический расход воздуха, который необходимо вовлечь в струю для сжигания газа в количестве  $G_r$ , кг/с;

$w_b$  и  $w_r$  — средние скорости при определении количества движения (см. с. 259 «Аэродинамика струи»). При приближенных расчетах, когда истекающие газ и воздух характеризуются хорошо развитой турбулентностью, можно считать, что  $k_{02r} = k_{02b} \approx 1$ ;

$Eu$  — критерий Эйлера.

$$Eu = \frac{P - P_{\text{окр}}}{\rho_r w_r^2}.$$

Здесь  $P_{\text{окр}}$  — статическое давление в среде, куда истекает газ, Н/м<sup>2</sup>;

$P_0$  — статическое давление газа в истекающей струе в начальном сечении, Н/м<sup>2</sup>.

При дозвуковых скоростях истечения газа  $P_0 = P_{\text{окр}}$  и  $Eu = 0$ . В общем случае  $P_0 \geq P_{\text{окр}}$ .

Критерий Эйлера можно определить также по формуле:

$$Eu = \frac{1}{k} \left( 1 - \frac{P_{\text{окр}}}{P_{\text{кр}}} \right) = \frac{1}{k} \left( 1 - \frac{G_{\text{кр}}^0}{G_0} \right);$$

$Fr$  — критерий Фруда

$$Fr = \omega^2 / g d_0.$$

Значения критерия Фруда могут меняться:  $Fr=0-\infty$ . Чем больше критерий Фруда, тем в меньшей мере сила земного притяжения влияет на размеры факела. Длину факела, величина которой не зависит от силы земного тяготения, называют предельной и обозначают через  $L_0$ :

$$L_0 = \frac{d_0 N_0 (1 + \omega) - \frac{1}{b_0}}{\sqrt{1 + I_n + Eu}} \sqrt{\frac{\rho_r}{\rho_{\text{см}}}}.$$

Написание выражения для длины факела  $L_\phi$  можно упростить, введя два комплекса: симплекс Семикина  $Sn = \frac{L_\phi}{d_0} : \frac{L_0}{d_0}$  и критерий Китаева

$$Kt = \frac{1 + I_n + Eu}{f(\omega) f_1(\rho)} \cdot \frac{Fr}{\left( \frac{L_0}{d_0} \right)^3}.$$

Тогда уравнение для расчета длины факела в обобщенном виде принимает вид

$$Sn^5 - Kt (1 - Sn^2) = 0.$$

Симплекс Семикина может меняться от 0 до 1, а критерий Китаева — в пределах  $0 - \infty$ . Графическое решение этого уравнения для длины факела приведено на рис. 141, из которого видно, что при  $Kt \geq 20$

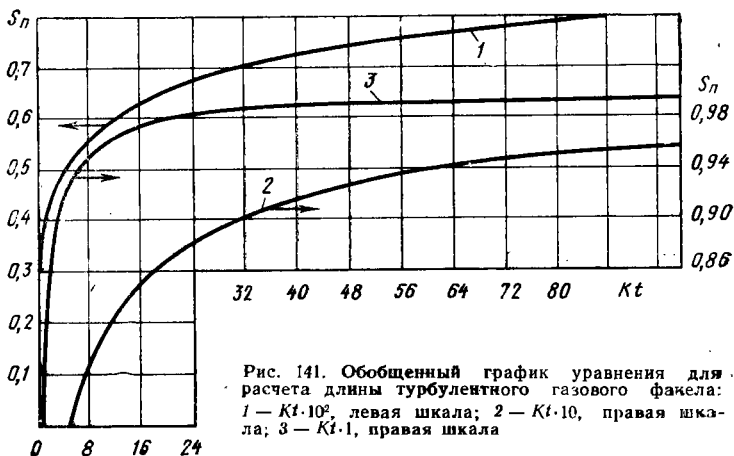


Рис. 141. Обобщенный график уравнения для расчета длины турбулентного газового факела: 1 —  $Kt \cdot 10^2$ , левая шкала; 2 —  $Kt \cdot 10$ , правая шкала; 3 —  $Kt \cdot 1$ , правая шкала

практически симплекс Семикина не меняется (длина факела не меняется), и можно пользоваться для определения длины факела  $L_\phi$  выражением для предельной длины факела  $L_0$ , т. е.  $L_\phi \approx L_0$ . Ошибка при такой замене составляет всего лишь  $\sim 2\%$ .

Если воздушный поток направлен к газовому под углом встречи  $\delta$ , то длину факела необходимо умножить на поправочный коэффициент

$$\Delta = \frac{1}{\sqrt{1 + I_n (1 - \cos \delta)}}.$$

В том случае, когда свойства факела не зависят от действия силы земного притяжения, т. е. при значении критерия Китаева  $Kt \geq 20$ , и при организации турбулентного факела при внешнем перемешивании газа с воздухом в процессе горения (отсутствует предварительное перемешивание газа с воздухом) можно пользоваться более простыми зависимостями:

$$L_{\Phi} \approx L_0 = \frac{\sigma \Pi d_0}{\sqrt{1 + I_b + Eu}} = \frac{0,48 \sqrt{i_{п.г}} \omega_{г.г}}{\sqrt{1 + I_b + Eu}} d_0.$$

При дозвуковых скоростях истечения газа, когда  $\omega_{г.г} < 0,4 \omega_{кр}$ , т. е. при статическом давлении газа перед соплом до  $7-8 \text{ кН/м}^2$  (700—800 мм вод. ст.), когда критерий Эйлера равен нулю ( $Kt > 20$ ):

$$L_{\Phi} = \frac{0,48 d_0 \sqrt{i_{п.г}} \omega_{г.г}}{\sqrt{1 + I_b}}.$$

При отсутствии сопутствующего воздушного потока, когда весь воздух для организации факела вовлекается из окружающей атмосферы ( $Kt > 20$ ):

$$L_{\Phi} = 0,48 d_0 \sqrt{i_{п.г}} \omega_{г.г} \approx r_0 \sqrt{i_{п.г}} \omega_{г.г} = r_0 \Pi = \frac{\Pi}{2} d_0.$$

При отсутствии подогрева газа ( $Kt > 20$ )

$$L_{\Phi} = r_0 \sqrt{i_{п.г}} L_{теор} \rho_{о.г}$$

или

$$L_{\Phi} = 0,54 d_0 \sqrt{i_{п.г}} L_{теор} = 0,54 d_0 \sqrt{(Q_n^p + i_{г.г} + \omega i_b) L_{теор}},$$

пренебрегая энтальпией газа, считая, что  $i_{г.г} = 0$ , получим

$$L_{\Phi} = 0,54 d_0 \sqrt{\left(Q_n^p + \frac{1,293 L_{теор}}{\rho_{о.г}} i_b\right) L_{теор}}.$$

После подстановки числового значения энтальпии воздуха при  $20^\circ\text{C}$ , принимая  $i = 26 \text{ кДж/кг}$ , имеем

$$L_{\Phi} = 0,54 d_0 \sqrt{\left(Q_n^p + 26 \frac{L_{теор}}{\rho_{о.г}}\right) L_{теор}}.$$

Здесь  $L_{\Phi}$  — длина факела, м;

$d_0$  — диаметр газового сопла, м;

$Q_n^p$  — теплота сгорания газа, кДж/кг;

$L_{теор}$  — теоретический расход воздуха,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;

$\rho_{ог}$  — плотность газа при нормальных условиях,  $\text{кг/м}^3$ .

Б. И. Китаев и П. В. Левченко получили формулу для видимой длины свободно горящего турбулентного факела (газ холодный):

$$L_{\Phi} = 14,0 K \omega_{г.г}^{0,34} d_0^{0,83},$$

где  $\omega_{г.г}$  — скорость истечения газа из сопла, м/с;

$d_0$  — диаметр сопла, м;

$K$  — коэффициент, зависящий от теплоты сгорания и состава горючего газа, равный

$$\frac{0,24}{4187} Q_n^p.$$

А. Л. Кюде предложено выражение на основании исследований свободно горящего факела городского газа

$$L_{\Phi} = K_1 \frac{(1 + \omega_v)}{R_c} \sqrt{\frac{V_{г.г} \rho_0}{\omega_{г.г}}} \text{ м,}$$

где  $\omega_0$  — стехиометрическое число, отношение объемов воздуха и топлива,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;

$K_1$  — опытный коэффициент, равный 20,8;

$R_c$  — массовое отношение среды струи к ее горючей части,  $\text{кг}/\text{кг}$ .

По данным Е. И. Казанцева и И. Д. Семикина, длина турбулентного факела различных коксо-доменных смесей может быть определена для сжигания в спокойном воздухе по формуле

$$L_\Phi = \frac{\omega_0}{3,75 + 0,925 \omega_r} \cdot (5,6 + 0,005 Q_H^p) d_0$$

и при сжигании в потоке воздуха, движущегося со скоростью  $\omega_b$ :

$$L_\Phi = \frac{\omega_0}{2,4 + 0,925 \omega_r + \omega_b} (5,6 + 0,005 Q_H^p) d_0.$$

По исследованиям И. Д. Семикина, длину факела можно определить из формулы

$$L_\Phi = \left( 1 + \frac{V_0^B \rho_0^B}{\rho_0^r} \right) \frac{11,5 d_0}{\sqrt{\frac{T_r}{273} + \frac{4}{\omega_{o.r}}} \sqrt{\frac{273}{T_r}}}.$$

По данным Е. И. Казанцева, при скорости истечения газа  $\omega_r > 30 \text{ м/с}$  и скорости параллельно идущего воздуха  $\omega_b > 5 \text{ м/с}$  можно пользоваться формулой

$$L_\Phi = \frac{L_{\Phi, \max} \omega_r}{\omega_r + \omega_b},$$

где  $\omega_r$  и  $\omega_b$  — действительные скорости истечения газа и воздуха.

### Факел предварительно перемешанной газо-воздушной смеси

Длину турбулентного факела газо-воздушной смеси рассчитывают по формулам Аверина—Семикина (см. выше) с тем отличием, что вместо комплексного параметра  $\Pi$  подставляют  $\Pi_1$ . Комплексный параметр  $\Pi_1$  зависит от коэффициента расхода первичного воздуха  $\alpha_1$ :

$$\Pi_1 = \sqrt{i_{п.с} (\alpha_1 + \omega_a) \rho_{см}},$$

где  $i_{п.с}$  — калориметрическое теплосодержание продуктов неполного сгорания 1 кг смеси газа с воздухом;

$$i_{п.с} = Q_H^{см} + i_{см} + \omega_a i_{см} \text{ кДж/кг};$$

$Q_H^{см}$  — теплота сгорания 1 кг газо-воздушной смеси с коэффициентом расхода первичного воздуха  $\alpha_1$ ;

$$Q_H^{см} = \varphi_r Q_H^p;$$

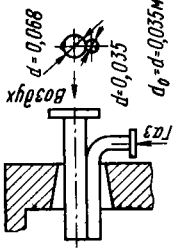
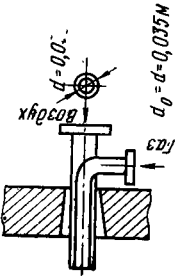
$Q_H^p$  — теплота сгорания 1 кг чистого газа,  $\text{кДж/кг}$ ;

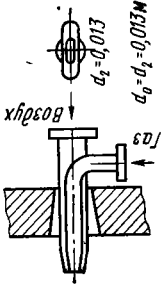
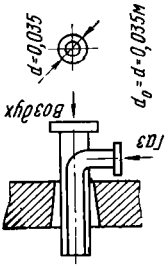
$\varphi_r$  — доля массы газа в смеси с воздухом;

$$\varphi_r = \frac{1}{1 + \alpha_1 L_{теор}} \frac{\rho_{0r}}{\rho_{0см}};$$

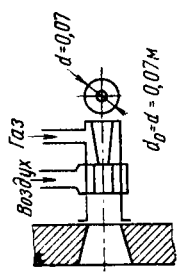
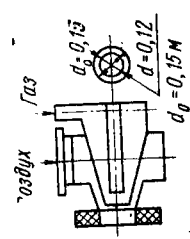
Таблица XI-4

## Характеристики факелов при различных условиях сжигания топлива

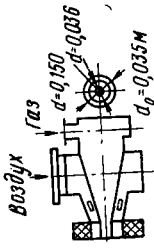
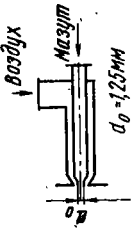
| № п.п. | Тип, конструкция и выходной диаметр (м) топливосжигающего устройства                                                                                             | Теплота сгорания топлива и коэффициент расхода воздуха $\alpha$                          | Выходные температуры, °С, и скорости, м/с                                                                                                 | Среда распространения факела и ее температура                           | Характеристики факела                                 |                                                                               |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
|        |                                                                                                                                                                  |                                                                                          |                                                                                                                                           |                                                                         | $l_{\text{ф}}$ , м,<br>$q_{\text{об. ф}}$ :<br>кВт/м³ | $\frac{l_{\text{ф}}}{d_0} \left( \frac{t_{\text{ф}}}{d_{\text{нач}}} \right)$ |
| 1      | <p>Двухпроводная газовая горелка с рядом расположенными соплами</p>           | <p>Коксовый газ,<br/><math>Q_R = 14820</math> (3540);<br/><math>\alpha = 1,01</math></p> | <p>Топливо:<br/><math>t_r = 14</math>;<br/><math>w_r = 10,1</math>.<br/>Воздух:<br/><math>t_a = 0</math>;<br/><math>w_a = 10,5</math></p> | <p>Продукты сгорания,<br/><math>t_d = 800-1250^\circ\text{C}</math></p> | 4                                                     | 110                                                                           |
| 2      | <p>Двухпроводная газовая горелка с concentрически расположенными соплами</p>  | <p>То же,<br/><math>\alpha = 0,98</math></p>                                             | <p>Температуры те же,<br/><math>w_r = 10,1</math>;<br/><math>w_a = 10,8</math></p>                                                        | <p>Продукты сгорания,<br/><math>t_d = 800-1250^\circ\text{C}</math></p> | 2,4<br>60                                             | 70                                                                            |

| № п.п       | Тип, конструкция и выходной диаметр (мм) топливновысвигашего устройства                                                                         | Теплота сгорания топлива и коэффициент расхода воздуха $\alpha$            | Выходные температуры, °С, и скорости, м/с                                                                                  | Среда распространения факела и ее температуры | Характеристики факела                                 |                                                                               |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
|             |                                                                                                                                                 |                                                                            |                                                                                                                            |                                               | $l_{\text{ф}}$ , м,<br>$q_{\text{об. ф}}$ :<br>кВт/м³ | $\frac{l_{\text{ф}}}{d_0} \left( \frac{l_{\text{ф}}}{d_{\text{нач}}} \right)$ |
| 3           | Двухпроводная газовая горелка, но со сплюснутыми соплами<br> | Коксовый газ,<br>$\alpha = 1,01$                                           | Температуры те же,<br>$w_{\text{г}} = 25,6$ ;<br>$w_{\text{в}} = 21,8$                                                     | Среда и температуры — те же                   | 1,1                                                   | 85                                                                            |
| 4<br>5<br>6 | То же, что в п. 2, но с завихрителем на пути воздуха<br>     | Коксовый газ:<br>$\alpha = 0,99$ ;<br>$\alpha = 1,18$ ;<br>$\alpha = 1,71$ | Температуры те же,<br>$w_{\text{г}} = 10,1$ ;<br>$w_{\text{в}} = 10,1$ ;<br>$w_{\text{в}} = 12$ ;<br>$w_{\text{в}} = 17,4$ | Среда и температуры — те же                   | 1,3<br>1,03<br>0,68                                   | 37<br>30<br>20                                                                |

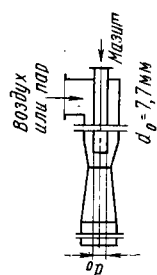
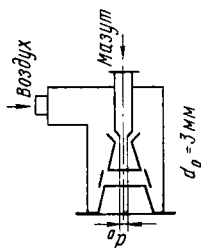
Продолжение табл. XI-4

| № п.        | Тип, конструкция и выходной диаметр (м) топливосжигающего устройства                                                                                                                      | Теплота сгорания топлива и коэффициент расхода воздуха $\alpha$         | Выходные температуры, °С, и скорости, м/с                               | Среда распространения факела и ее температура           | Характеристики факела                      |                                                                      |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
|             |                                                                                                                                                                                           |                                                                         |                                                                         |                                                         | $l_{\phi}$ , м,<br>$q_{об. \phi}$ , кВт/м³ | $\frac{l_{\phi}}{d_0} \cdot \left( \frac{l_{\phi}}{d_{нач}} \right)$ |
| 7<br>8<br>9 | Турбулентная газовая горелка (двухпроводная, с внутренним перемешиванием)<br>                          | Коксовый газ,<br>$\alpha = 0,98$ ;<br>$\alpha = 1$ ;<br>$\alpha = 1,18$ | Температуры те же                                                       | Среда и температуры — те же                             | 0,7<br>0,55<br>0,18                        | 10<br>8<br>2,6                                                       |
| 10<br>11    | Турбулентная газовая горелка (двухпроводная, худшая, чем в пп. 7 и 9, с внутренним перемешиванием)<br> | Природный газ,<br>$\alpha = 1$ ;<br>$\alpha = 1,07$                     | Смесь:<br>$t_{см} \approx 20$ ;<br>$w_{см} = 14,9$ ;<br>$w_{см} = 15,9$ | Продукты сгорания,<br>$t_d = 1500-1600^{\circ}\text{C}$ | 1,8<br>1,2                                 | 12<br>8                                                              |

Продолжение табл. XI-4

| № п.п.   | Тип, конструкция и выходной диаметр (мм) топливно-жигающего устройства                                                                                                                       | Теплота сгорания топлива и коэффициент расхода воздуха $\alpha$ | Выходные температуры, °С, и скорости, м/с                                                                                                                                     | Среда распространения факела и ее температура           | Характеристики факела                         |                                                                |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
|          |                                                                                                                                                                                              |                                                                 |                                                                                                                                                                               |                                                         | $l_{\phi}$ , м,<br>$q_{об. \phi}$ :<br>кВт/м³ | $\frac{l_{\phi}}{d_0} \left( \frac{l_{\phi}}{d_{нач}} \right)$ |
| 12<br>13 | Двухпроводная газовая горелка с концентрически расположенными соплами (воздух подведен тангенциально)<br> | Природный газ,<br>$\alpha = 1$<br>$\alpha = 1,07$               | Топливо:<br>$t_r = 15-20$ ;<br>$w_r = 24,6$<br>Воздух:<br>$t_a = 20-35$ ;<br>$w_a = 14,2$ ;<br>$w_a = 15,2$                                                                   | Продукты сгорания,<br>$t_d = 1400-1500^{\circ}\text{C}$ | $>2,5$<br>2,5<br>324                          | $>70$<br>70                                                    |
| 14       | Двухпроводная газовая горелка с концентрически расположенными соплами ГНП (газовое сопло с осевым отверстием),<br>$d_{нач} = d = 0,093$ м                                                    | То же,<br>$\alpha = 1,05$                                       | Смесь:<br>$t_{см} = 20$ ;<br>$w_{см} = 18$                                                                                                                                    | Продукты сгорания,<br>$t_d = 1400-1500^{\circ}\text{C}$ | 1,77<br>350                                   | 20                                                             |
| 15       | Мазутная одноступенчатая форсунка низкого давления ФОБ-2<br>                                              | Мазут,<br>$\alpha = 1,05-1,1$                                   | Топливо:<br>$t_m = 70-80$ ;<br>$P = 100$ кН/м²<br>Воздух:<br>$t_a = 0$ ;<br>$P = 7$ кН/м²;<br>$t_a = 300^{\circ}\text{C}$ ;<br>$P = 3$ кН/м²;<br>$t_a = 0$ ;<br>$P = 3$ кН/м² | Продукты сгорания,<br>$t_d = 800-1000^{\circ}\text{C}$  | 0,65<br>0,65<br>1                             | 520<br>520<br>800                                              |

| № п. п. | Тип, конструкция и выходной диаметр (м) топливосжигающего устройства                  | Теплота сгорания топлива и коэффициент расхода воздуха $\alpha$                              | Выходные температуры, °С, и скорости, м/с                                                                                       | Среда распространения факела и ее температура             | Характеристики факела                       |                                                                              |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
|         |                                                                                       |                                                                                              |                                                                                                                                 |                                                           | $l_{\phi}$ , м,<br>$q_{об. ф.}$ :<br>кВт/м² | $l_{\phi} \left( \frac{l_{\phi}}{d_{фак}} \right)$<br>$\frac{l_{\phi}}{d_0}$ |
| 18      | Мазутная двухступенчатая форсунка низкого давления типа ФДБ-1                         | Мазут,<br>$\alpha = 1,05 - 1,1$                                                              | Топливо:<br>$t_m = 70 - 80$ ;<br>$P = 100$ кН/м².<br>Воздух:<br>$t_b = 23$ ;<br>$P = 7$ кН/м²;<br>$t_b = 23$ ;<br>$P = 3$ кН/м² | Продукты сгорания,<br>$t_d = 800 - 1000^{\circ}\text{C}$  | 0,65<br>1,01                                | 220<br>350                                                                   |
| 19      |                                                                                       |                                                                                              |                                                                                                                                 |                                                           |                                             |                                                                              |
| 20      | Пневматическая форсунка высокого давления (ДМИ) с паровым или воздушным распыливанием | Мазут,<br>$Q_p = 39770$ (9500),<br>$\alpha = 1,05$ ;<br>$\alpha = 1,22$ ;<br>$\alpha = 1,45$ | Топливо:<br>$t_m = 70 - 80$ .<br>Воздух:<br>$t_b = 0$ .<br>Пар:<br>$t_n = 150$ .<br>Скорость выхода распылителя<br>300—400      | Продукты сгорания,<br>$t_d = 1000 - 1300^{\circ}\text{C}$ | 4<br>3<br>1,85                              | 520<br>390<br>240                                                            |
| 21      |                                                                                       |                                                                                              |                                                                                                                                 |                                                           |                                             |                                                                              |
| 22      |                                                                                       |                                                                                              |                                                                                                                                 |                                                           |                                             |                                                                              |



$\varphi_v$  — доля массы воздуха в газо-воздушной смеси;

$$\varphi_v = \frac{\alpha_1 L_{\text{теор}}}{1 + \alpha_1 L_{\text{теор}}} \frac{\rho_{0v}}{\rho_{0см}};$$

$\rho_{0в}$ ,  $\rho_{0г}$ ,  $\rho_{0см}$  — соответственно плотности при нормальных условиях воздуха, газа, газо-воздушной смеси, кг/м<sup>3</sup>;

$\omega_a$  — стехиометрическое число первичной газо-воздушной смеси, если ее рассматривать как самостоятельный горючий газ (при коэффициенте расхода первичного воздуха  $\alpha_1$ ), кг/кг;  $\omega_a = \omega_{гг} - \varphi_v$ .

По данным Н. Н. Норкина, высота внутреннего конуса пламени  $h$  при факельном сжигании горючих смесей газа с первичным воздухом может быть найдена из уравнения

$$h = \frac{d_0}{2} \sqrt{\frac{\omega_g^2}{u^2} - 1} \text{ м,}$$

где  $d_0$  — диаметр сопла, м;

$u$  — скорость распространения пламени, м/с;

$\omega_g$  — скорость истечения газо-воздушной смеси, м/с.

### Опытные данные

Для многих практических случаев могут оказаться полезными опытные данные по характеристике факелов существующих конструкций горелок и форсунок, приведенные в табл. XI-4.

# ТЕПЛОПЕРЕДАЧА И НАГРЕВ ИЗДЕЛИЙ

## Условные обозначения

- $A$  — коэффициент поглощения;  
 $a = \lambda / \rho c$  — коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{ч}$ ;  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $L^2 T^{-1}$ ;  
 $c$  — теплоемкость,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $L^2 T^{-2} \theta^{-1}$ ;  
 $C$  — коэффициент излучения,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{K}^4)$ ;  $MT^{-3} \theta^{-4}$ ;  
 $C_H$  — скорость нагрева,  $^\circ\text{C}/\text{ч}$ ;  $T^{-1} \theta$ ;  
 $D$  — коэффициент пропускания;  
 $d$  — диаметр,  $\text{м}$ ;  $L$ ;  
 $E$  — излучательная способность,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $MT^{-3}$ ;  
 $\exp x = e^x$  — условное написание экспоненции  $x$ ;  
 $E$  — модуль упругости,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ;  $L^{-1} MT^{-2}$ ;  
 $F_{ik}$  — расчетная (взаимная) поверхность при определении количества тепла, переданного с  $i$ -того тела на  $k$ -тое,  $\text{м}^2$ ;  $L^2$ ;  
 $F$  — поверхность,  $\text{м}^2$ ;  $L^2$ ;  
 $Gr = \frac{g l^3 \beta \Delta t}{\nu^2}$  — критерий Грассгофа;  
 $Gr_{cp}$  — критерий  $Gr$ , определенный по средним величинам;  
 $g$  — ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $LT^{-2}$ ;  
 $h = \alpha / \lambda$  — относительный коэффициент теплоотдачи,  $1/\text{м}$ ;  $L^{-1}$ ;  
 $i$  — удельная энтальпия,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;  $L^2 T^{-2}$ ;  
 $\Delta i$  — приращение энтальпии  $\Delta i = i_k - i_n$ ,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;  $L^2 T^{-2}$ ;  
 $I$  — энтальпия,  $\text{кДж}$ ;  $L^2 MT^{-2}$ ;  
 $I$  — интенсивность излучения,  $\text{Вт}/\text{м}^3$ ;  $L^{-1} MT^{-3}$ ;  
 $J_\nu$  — модифицированные функции Бесселя I рода  $\nu$ -го порядка;  
 $J_{\mu_n}$  — функции Бесселя по параметру  $\mu_n$ , где  $n = 0, 1, 2, 3 \dots$ ;  
 $J_1$  — функции Бесселя первого порядка I рода;  
 $J_0$  — функции Бесселя нулевого порядка I рода;  
 $K$  — коэффициент теплопередачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $MT^{-3} \theta^{-1}$ ;  
 $k; k_1; k_2; k_3$  — коэффициенты, зависящие от формы тела;  
 $K$  — модифицированные функции Бесселя второго рода;  
 $l$  — длина,  $\text{м}$ ;  $L$ ;  
 $Nu = ad / \lambda$  — критерий Нуссельта;  
 $Pr = \nu / a$  — критерий Прандтля;  
 $Pe = wl / a$  — критерий Пекле;  
 $P$  — давление,  $\text{Н}/\text{м}^2$  (кгс, мм. вод. ст.);  $L^{-1} MT^{-2}$ ;  
 $p$  — парциальное давление;  
 $Q$  — количество тепла,  $\text{кДж}$ ;  $L^2 MT^{-2}$ ;  
 $q$  — удельный тепловой поток,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $MT^{-3}$ ;  
 $R$  — тепловое сопротивление,  $R = \frac{s}{\lambda}$ ;  $R = \frac{1}{\alpha}$ ,  $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ ;  
 $M^{-1} T^3 \theta$ ;  
 $r$  — радиус,  $\text{м}$ ;  $L$ ;  
 $Re = wd / \nu$  — критерий Рейнольдса;  
 $R$  — коэффициент отражения;

$S, B, L, R, H$  — линейные размеры изделий;  $L$ ;  
 $s$  — толщина прогреваемого слоя, м;  $L$ ; эффективная длина луча, м;  $L$ ; толщина слоя, м;  $L$ ;  
 $t$  — температура по столбчатой шкале, °C;  $\theta$ ;  
 $T$  — абсолютная температура, К;  $\theta$ ;  
 $\Delta t = t_1 - t_2$  — разность температур, °C;  $\theta$ ;  
 $V$  — объем, м<sup>3</sup>;  $L^3$ ;  
 $w$  — скорость потока жидкости, м/с;  $LT^{-1}$ ;  
 $Y$  — функции Бесселя II рода;  
 $\alpha_k$  — коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $MT^{-3} \theta^{-1}$ ;  
 $\alpha_{\text{л}}$  — коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $MT^{-3} \theta^{-1}$ ;  
 $\alpha = \alpha_k + \alpha_{\text{л}}$  — коэффициент теплоотдачи суммарный, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $MT^{-3} \theta^{-1}$ ;  
 $\beta$  — коэффициент линейного (для газов объемного) расширения, 1/°C;  $\theta^{-1}$ ;  
 $\delta$  — толщина, линейный размер, м;  $L$ ;  
 $\epsilon$  — степень черноты, относительный коэффициент излучения;  
 $\epsilon_0$  — степень черноты абсолютно черного тела;  
 $\epsilon_{\text{CO}_2}$  — степень черноты углекислоты;  
 $\epsilon_{\text{H}_2\text{O}}$  — степень черноты водяных паров;  
 $\Delta \epsilon_{\text{д}}$  — поправочный коэффициент на совместное излучение H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub>;  
 $\eta_r$  — коэффициент эффективности газового излучения;  
 $\eta_l$  — корни трансцендентного уравнения,  $l=0, 1, 2, 3, \dots$ ;  
 $\theta$  — скорость подъема температуры печи, °C/ч;  $T^{-1}\theta$ ;  
 $\vartheta$  — безразмерная температура;  
 $\lambda$  — коэффициент теплопроводности Вт/(м·°C);  $LMT^{-3}\theta^{-1}$ ;  
 $\lambda$  — длина волны, м, мм, мкм, нм;  $L$ ;  
 $\mu$  — коэффициент вязкости, Н·с/м<sup>2</sup>;  $L^{-1}MT^{-1}$ ;  
 $\nu$  — кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с;  $L^2T^{-1}$ ;  
 $\nu$  — пуассоновое отношение;  $\psi/\delta = \nu$ ,  $\psi$  — относительное сжатие;  $\delta$  — относительное удлинение поперечного сечения образца. Для стали  $\nu=0,3$ ;  
 $\rho$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $L^{-3}M$ ;  
 $\sigma_0$  — константа излучения, равная  $(5,6687 \pm 0,010) \cdot 10^{-3}$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $MT^{-3}\theta^{-1}$ ;  
 $\sigma$  — напряжение, Н/м<sup>2</sup>;  $L^{-1}MT^{-2}$ ;  
 $\tau$  — время, ч, с;  $T$ ;  
 $\varphi_{ik}$  — угловой коэффициент с  $i$ -того тела на  $k$ -тое (коэффициент облученности);  
 $\varphi; \psi; F; f; \Phi$  — обозначения функций;

#### Индексы

$k$  — параметры кладки при расчете теплообмена между серыми телами; конечная температура изделия;  
 $m$  — максимальное значение температуры;  
 $m$  — параметры металла;  
 $n$  — начальная температура изделия;  
 $p$  — параметры печи;  
 $p_{\text{ов}}$  — температуры поверхности изделия;  
 $\rho$  — средняя температура по сечению изделия;  
 $\rho$  — температуры на оси изделия;  
 $\tau$  — параметры инерционного периода нагрева;

## ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ПОСРЕДСТВОМ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ  
ПРИ СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

## Теплопередача через плоскую многослойную стенку

Количество тепла, переданного через  $n$ -слойную стенку,  $Q$  кДж, удельный тепловой поток  $q$  Вт/м<sup>2</sup>, температуру между слоями  $t$  определяют по следующим формулам:

$$Q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\frac{1}{\alpha} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{s_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha'}} F \tau =$$

$$= \frac{t_1 - t_{n+1}}{R + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R'} F \tau = \frac{t_1 - t_{n+1}}{R + \sum R_i + R'} F \tau;$$

$$q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{R + \sum R_i + R'};$$

$$t_x = t_1 - \frac{Q}{F \tau} \left( \frac{1}{\alpha} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{s_{x-1}}{\lambda_{x-1}} \right);$$

$$q = \frac{Q}{F \tau}; \quad R = \frac{s}{\lambda} \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}.$$

## Теплопередача через цилиндрическую стенку

Для однослойной цилиндрической стенки основные расчетные формулы имеют следующий вид.

Тепловой поток через 1 м:

$$q = \frac{2 \pi \lambda (t_1 - t_2)}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \text{ Вт/м};$$

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha \pi d_1} + \frac{1}{2 \pi \lambda \ln \frac{d_2}{d_1}} + \frac{1}{\alpha' \pi d_2}} \text{ Вт/м};$$

текущая температура

$$t = t_1 - \frac{t_1 - t_2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \ln \frac{r}{r_1} \text{ } ^\circ\text{C}; \quad t = t_1 - \frac{q}{2 \pi \lambda} \ln \frac{r}{r_1};$$

$$t = t_1 - q \left( \frac{1}{\alpha \pi d_1} + \frac{1}{2 \pi \lambda} \ln \frac{d}{d_1} \right).$$

Для многослойной цилиндрической стенки справедливы следующие зависимости:

$$Q = \frac{2,727 (t_1 - t_{n+1}) l \tau}{\frac{1}{\lambda_1} \lg \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \lg \frac{d_3}{d_2} + \dots + \frac{1}{\lambda_n} \lg \frac{d_{n+1}}{d_n}};$$

$$t_n = t_1 - \frac{Q}{2,727 l \cdot \tau} (R_1 + R_2 + \dots + R_{n-1});$$

$$Q = \frac{(t_1 - t_{n+1}) l \tau}{\frac{1}{\alpha \pi d_1} + \frac{1}{2 \pi \lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2 \pi \lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \dots + \frac{1}{2 \pi \lambda_n} \ln \frac{d_{n+1}}{d_n} + \frac{1}{\alpha' \pi d_n}};$$

$$t_n = t_1 - \frac{Q}{l \tau} \times$$

$$\times \left( \frac{1}{\alpha \pi d_1} + \frac{1}{2 \pi \lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2 \pi \lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \dots + \frac{1}{2 \pi \lambda_{n-1}} \ln \frac{d_n}{d_{n-1}} \right).$$

Для однослойной цилиндрической трубы потери тепла с 1 м возрастают с увеличением диаметра  $d$  до  $d_{\text{опт}}$ , после чего начинается снижение потерь тепла. Оптимальный диаметр трубопровода  $d_{\text{опт}} = \frac{2\lambda}{\alpha'}$ . Для стальной трубы  $d_{\text{опт}} = 8350$  мм; для трубы, покрытой асбестовой массой,  $d_{\text{опт}} = 25$  мм; для бетонной трубы  $d_{\text{опт}} = 167$  мм (значения  $d_{\text{опт}}$  даны для  $\alpha' = 14$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

### Теплопередача через оребренную поверхность

Оребрение поверхности (например, трубы игольчатых рекуператоров) повышает количество передаваемого тепла. Оребрение рекомендуется производить на стороне с более низким коэффициентом теплоотдачи. Количество тепла определяется по формуле

$$Q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha} + \frac{s}{\lambda} + \frac{F}{F_p} \frac{1}{\alpha'}} F \tau \text{ кДж},$$

где  $F$  — поверхность трубы, м<sup>2</sup>;

$F_p$  — поверхность оребренной трубы.

### ТЕПЛОТДАЧА КОНВЕКЦИЕЙ

#### Теплоотдача при свободной конвекции

Процесс теплообмена при свободном движении жидкости, обусловленном разностью плотностей нагретых и холодных элементарных объемов называется свободной конвекцией. При расположении нагреваемого или охлаждаемого тела в неограниченном объеме расчетные формулы имеют вид:  $Nu = C(Pr \cdot Gr)^n$

1) при  $10^{-3} < Pr \cdot Gr < 5 \cdot 10^2$   $Re_{\text{лин}} - Ra = Pr \cdot Gr$ ;

$$\alpha_k = A_1 \left( \frac{\Delta t}{l^3} \right)^{1/3} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°С)}; \quad C = 1,18; \quad n = 1/8; \quad \text{Михаел}$$

2) при  $5 \cdot 10^2 < Pr \cdot Gr < 2 \cdot 10^7$

$$\alpha_k = A_2 \left( \frac{\Delta t}{l} \right)^{1/4} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°С)}; \quad C = 0,54; \quad n = 1/4;$$

3) при  $Pr \cdot Gr > 2 \cdot 10^7$   $\alpha_k = A_3 \Delta t^{1/3} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°С)}; \quad C = 0,135; \quad n = \frac{1}{3};$

4) при  $Pr \cdot Gr < 10^{-3}$   $Nu = 0,45$ .

Значения коэффициентов  $A$  приведены в табл. XII-1.

Приведенные формулы справедливы для любых жидкостей и тел любых размеров и формы. Если теплоотдающая поверхность обращена вверх, то  $\alpha_k$  увеличивается на 30%, если книзу — уменьшается на 30%.

Таблица XII-1

Значения коэффициентов  $A$  в формуле для определения теплообмена при свободной конвекции в неограниченном пространстве для воздуха и воды при различной температуре

## Для воздуха

| Коэффициенты | Температура, °C |      |       |      |       |       |       |       |       |       |
|--------------|-----------------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|              | -50             | -20  | 0     | 20   | 50    | 100   | 200   | 300   | 500   | 1000  |
| $A_1$        | 0,279           | —    | 0,291 | —    | 0,302 | 0,310 | 0,337 | 0,349 | 0,372 | 0,407 |
| $A_2$        | 1,50            | 1,44 | 1,42  | 1,36 | 1,32  | 1,27  | 1,22  | 1,10  | 1,00  | 0,815 |
| $A_3$        | 1,94            | 1,83 | 1,69  | 1,57 | 1,48  | 1,33  | 1,13  | 1,00  | 0,815 | 0,558 |

## Для воды

| Коэффициенты | 0     | 20    | 40   | 60    | 80   | 100  | 150  | 200  |
|--------------|-------|-------|------|-------|------|------|------|------|
| $A_1$        | 9,30  | 13,15 | 15,7 | 17,65 | 19,0 | 20,0 | 21,8 | 22,6 |
| $A_2$        | 69,8  | 111,6 | 149  | 178   | 204  | 227  | 274  | 305  |
| $A_3$        | 102,5 | 198   | 291  | 363   | 425  | 481  | 607  | 714  |

Физические характеристики относятся к средней температуре между жидкостью и стенкой:

$$t_{\text{ср}} = \frac{1}{2} (t_{\text{ст}} + t_{\text{ж}}).$$

За линейный размер  $l$  принимают: для шара и горизонтальной трубы — диаметр, для вертикально расположенной трубы или пластины — высоту участка теплообмена, для горизонтальной плиты — меньшую сторону плиты.

Процесс теплообмена в замкнутом ограниченном непроточном объеме рассчитывают по формулам для твердой стенки с введением вместо коэффициента теплопроводности эквивалентного коэффициента теплопроводности  $\lambda_{\text{экв}} = \varepsilon \cdot \lambda$ , где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности среды, заполняющей прослойку при средней температуре;  $\varepsilon$  — коэффициент, учитывающий влияние конвекции. В приближенных расчетах для значений  $(Gr \cdot Pr)_{\text{ср}} > 10^3$  можно применять следующую зависимость:

$$\varepsilon = 0,18 (Gr \cdot Pr)_{\text{ср}}^{0,25} = A \delta \sqrt[4]{\frac{\Delta t}{\delta}},$$

где

$$A = 0,18 \frac{(\beta \cdot g \cdot Pr)^{0,25}}{\sqrt[4]{0,5}};$$

$\delta$  — толщина прослойки, м;

$\Delta t$  — разность температур горячей  $t_{\text{ст}1}$  и холодной  $t_{\text{ст}2}$  поверхностей.

При вычислении критериев за определяющую температуру принята средняя температура  $t_{\text{ср}} = 0,5(t_{\text{ст}1} + t_{\text{ст}2})$ .

Если при расчете получается, что  $\varepsilon < 1$ , то это означает, что  $Gr \cdot Pr < 10^3$ , и, следовательно,  $\varepsilon = 1$ .

Для учета теплоотдачи излучением между стенками прослойки в величину эквивалентного коэффициента теплопроводности вводится дополнительный член  $\alpha_{\text{л}}$  — приведенный коэффициент теплоотдачи излучением  $\lambda_{\text{экв}} = \varepsilon \lambda + \alpha_{\text{л}} \delta$ .

## Теплоотдача при вынужденном движении жидкости

Коэффициент теплоотдачи в канале с постоянной температурой стенки при ламинарном течении жидкости с неизменными физическими свойствами можно определять из следующих выражений:

а) для круглой трубы (канала) при  $Pe \frac{d}{L} > 12$   $Nu = 1,61 \left( Pe \frac{d}{L} \right)^{1/2}$ ;

при  $Pe \frac{d}{L} < 12$   $Nu = 3,66$ ;

б) для плоской щели при  $Pe \frac{2\delta}{L} > 70$   $Nu = 1,85 \left( Pe \frac{2\delta}{L} \right)^{1/2}$ ; при  $Pe \frac{2\delta}{L} \leq 70$   $Nu = 7,60$ .

Для прямых гладких труб коэффициент теплоотдачи при турбулентном режиме следует определять по следующей зависимости:

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \left( \frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25},$$

где  $Pr_{ст}$  — определяется по температуре стенки, остальные значения критериев — по средней температуре жидкости и  $d_{гидр}$ .

Формула применима к трубам любой формы поперечного сечения — круглого, квадратного, прямоугольного, треугольного, кольцевого ( $d_2/d_1 = 1 \div 5,6$ ), щелевого ( $a/b = 1 \div 40$ ) и др., для всех упругих и капельных жидкостей при  $Re = 10 \div 5 \cdot 10^6$  и  $Pr = 0,6 \div 2500$ .

Так как для газов  $Pr \approx const$ , то формула упрощается и для воздуха имеет вид

$$Nu = 0,018 Re^{0,8}.$$

Приведенные формулы строго справедливы для  $l/d > 50$ . Для коротких труб при  $l/d < 50$  значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha_k$  надо умножать на поправочный коэффициент  $\epsilon_l$  из табл. XII-2.

Таблица XII-2

Значение поправочного коэффициента  $\epsilon_l$  при отношениях  $l/d$

| Re             | l/d  |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                | 1    | 2    | 5    | 10   | 15   | 20   | 30   | 40   | 50   |
| $1 \cdot 10^4$ | 1,65 | 1,50 | 1,34 | 1,23 | 1,17 | 1,13 | 1,07 | 1,03 | 1,00 |
| $2 \cdot 10^4$ | 1,51 | 1,40 | 1,27 | 1,18 | 1,13 | 1,10 | 1,05 | 1,02 | 1,00 |
| $5 \cdot 10^4$ | 1,34 | 1,27 | 1,18 | 1,13 | 1,10 | 1,08 | 1,04 | 1,02 | 1,00 |
| $1 \cdot 10^5$ | 1,28 | 1,22 | 1,15 | 1,10 | 1,08 | 1,06 | 1,03 | 1,02 | 1,00 |
| $1 \cdot 10^6$ | 1,14 | 1,10 | 1,08 | 1,05 | 1,04 | 1,03 | 1,02 | 1,01 | 1,00 |

Расчет теплоотдачи в изогнутых трубах проводится по формулам для прямой трубы с последующим введением поправочного коэффициента  $\epsilon_R$ , для змеевиковых труб он определяется из выражения

$$\epsilon_R = 1 + 1,77 \frac{d}{R},$$

где  $R$  — радиус змеевика;  
 $d$  — диаметр трубы.

Расчетные формулы теплоотдачи для пакета труб, омываемых любой жидкостью при  $Re = 2 \cdot 10^2 \div 2 \cdot 10^5$ , имеют следующий вид: при коридорном расположении труб в пучке

$$Nu = 0,23 Re^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \left( \frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25};$$

при шахматном расположении труб в пучке

$$Nu = 0,41 \cdot Re^{0,60} \cdot Pr^{0,33} \left( \frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}$$

По этим формулам расчет ведется на среднюю температуру жидкости, скорость в самом узком сечении ряда и диаметр труб.

Теплоотдача практически не зависит от относительного расстояния между трубами как по ширине, так и по глубине пучка.

Приведенные формулы для воздуха принимают следующий вид:

при коридорном расположении труб

$$Nu = 0,21 Re^{0,65};$$

при шахматном расположении труб

$$Nu = 0,37 Re^{0,60}$$

В промышленных теплообменниках вследствие загрязнения поверхности нагрева коэффициент теплоотдачи получается в среднем на 20% ниже и может быть определен по формулам:

при коридорном расположении труб

$$Nu = 0,18 Re^{0,64};$$

при шахматном расположении труб

$$Nu = 0,29 Re^{0,60}$$

Приведенные формулы позволяют определить среднее значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha_k$  для трубок третьего и всех последующих рядов в пучках. Для первого ряда труб  $\alpha_k$  составляет 60%; для второго ряда коридорного расположения 90% и для второго ряда шахматного расположения 70% значения, полученного по приведенным выше формулам.

Коэффициент теплоотдачи в решетке регенератора определяют по формулам:

для насадки в клетку

$$\alpha_k = 1,62 \frac{W^{0,5}}{d^{0,33}} T^{0,25};$$

для насадки сплошными каналами

$$\alpha_k = 0,86 \frac{W^{0,5}}{d^{0,33}} T^{0,25}$$

Кривые, построенные по этим формулам, представлены на рис. 142. При турбулентном режиме движения жидкости в области автомобильности, т. е. при  $Re > 10^4$ , теплоотдача от плиты описывается формулой

$$Nu = 0,032 Re^{0,8}$$

Для воды при вынужденном турбулентном движении коэффициент теплоотдачи конвекцией может быть подсчитан по выражению

$$\alpha = A \frac{W^{0,8}}{d^{0,2}}$$

Множитель  $A$  для воды имеет следующие значения.

Средняя температура охлаждающей воды

|                          |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $t_{ср}, ^\circ\text{C}$ | 0    | 20   | 40   | 60   | 80   | 100  | 150  | 200  |
| Коэффициент $A$          | 1430 | 1880 | 2325 | 2710 | 3070 | 3240 | 4080 | 4610 |

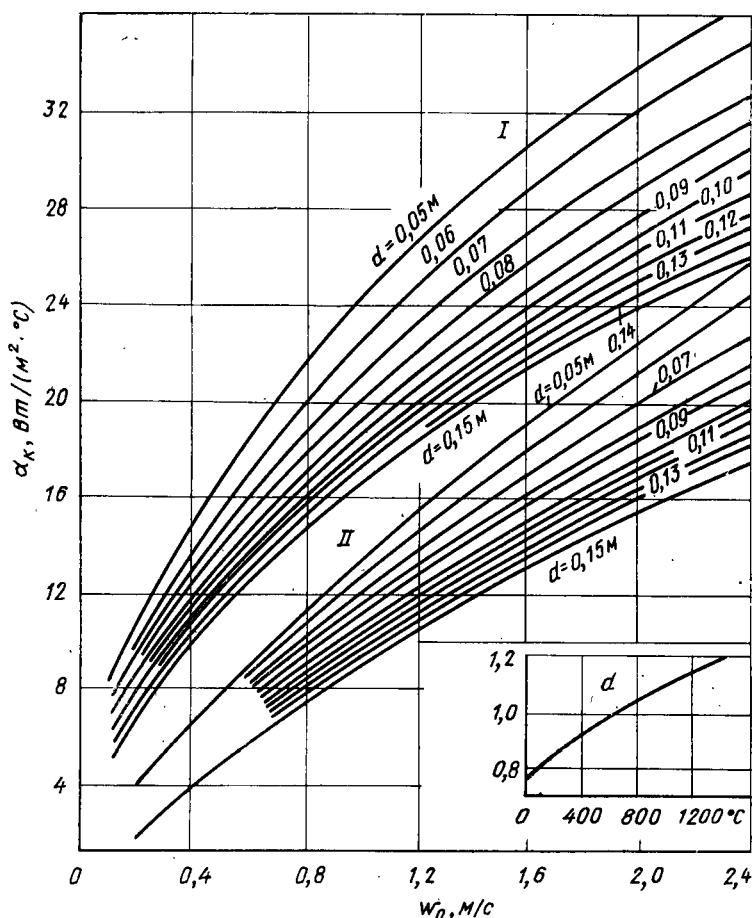


Рис. 142. Коэффициент теплоотдачи конвекцией  $\alpha_k$  в решетках регенераторов:

*I* — насадка в клетку; *II* — насадка сплошными каналами;  $\alpha$  — поправочный коэффициент на температуру;  $w_0$  — скорость газа при  $0^\circ\text{C}$

Расчетные формулы по теплообмену в засыпках из всевозможных металлических, угольных и других частиц самых различных размеров имеют следующий вид:

$$\text{при } 20 < Re < 200 \quad Nu = 0,106 Re;$$

$$\text{при } Re > 200 \quad Nu = 0,61 Re^{0,67}.$$

Критерии определяют следующим образом:

$$Nu = \frac{\alpha \sqrt{F}}{\lambda}; \quad Re = \frac{Z \sqrt{F}}{\eta},$$

где  $F$  — площадь всей поверхности данного элемента насадки или засыпки,  $\text{м}^2$ ;

$Z$  — скорость газа или жидкости (по массе), протекающих через слой, отнесенная к полной площади поперечного сечения слоя,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;

$\eta$  — коэффициент вязкости,  $\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ .

## Конвективный теплообмен при изменении агрегатного состояния

Коэффициент теплоотдачи при пузырьчатом кипении воды в большом объеме в условиях естественной конвекции для давлений от 0,2 до 10 МН/м<sup>2</sup> можно определять по следующей формуле:

$$\alpha_k = 45,4 \Delta t^{2,33} \cdot P^{0,5},$$

где  $\Delta t = t_{ст} - t_s$  — разность между температурой стенки и температурой насыщения пара при данном  $P$ .

### Ориентировочные пределы значений коэффициента теплоотдачи конвекцией $\alpha_k$

| Среда                                                  | $\alpha_k$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°C) |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| При нагревании и охлаждении воздуха . . . . .          | 1—60                                 |
| При нагревании и охлаждении перегретого пара . . . . . | 20—100                               |
| При нагревании и охлаждении масел . . . . .            | 60—1800                              |
| При нагревании и охлаждении воды . . . . .             | 200—10000                            |
| При кипении воды . . . . .                             | 6000—50000                           |
| При пленочной конденсации водяных паров . . . . .      | 5000—18000                           |
| При капельной конденсации водяных паров . . . . .      | 50000—140000                         |
| При конденсации органических паров . . . . .           | 600—2000                             |

Если температура поверхности теплообмена ниже температуры насыщения, на поверхности конденсируется пар. В противном случае происходит испарение жидкости. В этих случаях теплообмена определение коэффициента теплоотдачи представляет некоторую сложность. Ориентировочные данные, пригодные для расчетов в газопечной теплотехнике, приведены на рис. 143 и 144 и на с. 284. Конденсация паров носит пленочный характер, если конденсат смачивает поверхность теплообмена. Если

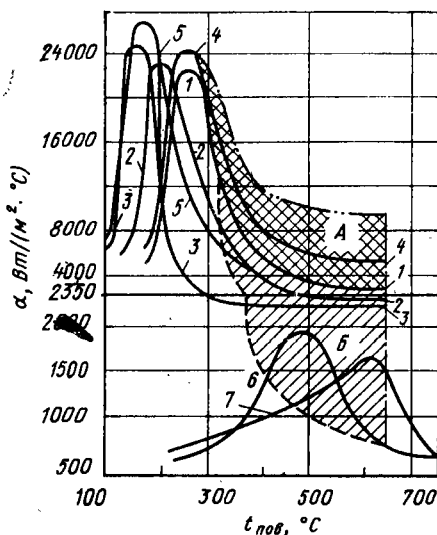


Рис. 143. Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  при охлаждении металла ( $t$  — температура поверхности) в воде и масле:

1 — вода при 20°C; 2 — то же, при 60°C; 3 — то же, при 100°C; 4 — то же, при 20°C, циркулирующая со скоростью 0,25 м/с; 5 — то же, при 0°C; 6 — масло легкое; 7 — масло тяжелое; А — водные растворы солей и щелочей; Б — водно-масляные эмульсии

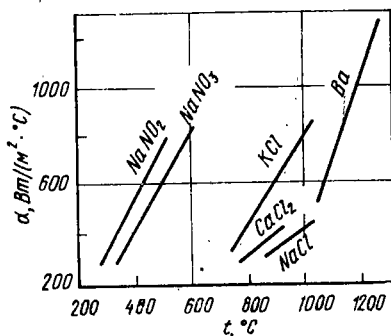


Рис. 144. Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  при нагреве стали в расплавленных солях и селитре

же конденсат не смачивает поверхности, конденсация оказывается капельной. На технических поверхностях при конденсации чистого водяного пара обычно наблюдается пленочная конденсация.

## ПЕРЕДАЧА ТЕПЛА ИЗЛУЧЕНИЕМ

### Основные понятия и законы

Носителем лучистой энергии являются электромагнитные колебания с длиной волны  $\lambda$  от долей микрометра до многих километров. Длина волны колебаний определяется из соотношения

$$c = \nu \cdot \lambda,$$

где  $c$  — скорость распространения колебаний (в пустоте  $c = 2,99776 \times 10^8$  км/с);

$\nu$  — число колебаний в 1 с.

Основное количество тепловой энергии при температурах печей переносится электромагнитными колебаниями с длинами волн 0,6—50 мкм.

За единицу лучистой энергии принимают количество ее, эквивалентное 1 Дж. Энергия  $Q$ , излучаемая телом в единицу времени, выражается в ваттах. Количество энергии, излучаемое единицей поверхности в единицу времени, называется излучательной или лучеиспускательной способностью тела и обозначается буквой  $E$ . Следовательно,  $E = \frac{Q}{F}$  Вт/м<sup>2</sup>;

$E = q$  — тепловому потоку излучением.

Интенсивность излучения представляет собой энергию, излучаемую телом в диапазоне длин от  $\lambda$  до  $\lambda + d\lambda$ , отнесенную к рассматриваемому интервалу длин волн  $d\lambda$ ,  $I_\lambda = \frac{dE}{d\lambda}$  Вт/(м<sup>2</sup>·мкм) или Вт/м<sup>3</sup>.

Лучеиспускание свойственно всем телам, и каждое из них излучает энергию непрерывно. Лучистая энергия распространяется в лучепрозрачной среде и пустоте. Попадая на поверхность другого тела или в лучепоглощающую среду, лучистая энергия поглощается, отражается и проходит полностью или частично в зависимости от свойств тела, характеризующих коэффициентами поглощающей способности тела  $A$ , отражательной способности  $R$  и способности пропускать лучистую энергию  $D$ .  $A + R + D = 1$ .

В зависимости от свойств различают:

а) абсолютно черное тело, которое способно поглощать лучи всевозможной длины от 0 до  $\infty$  и поглощает их на 100%,  $A = 1$ ;  $R = 0$ ;  $D = 0$ ;

б) абсолютно белое тело, способное отражать всю падающую на него лучистую энергию,  $A = 0$ ;  $R = 1$ ;  $D = 0$ ; если отражение происходит правильно, то тело называют зеркальным;

в) прозрачное тело, способное пропускать сквозь себя всю падающую на него лучистую энергию,  $A = 0$ ;  $R = 0$ ;  $D = 1$ ;

г) серое тело, способное поглощать волны всевозможной длины от 0 до  $\infty$ ; поглощение неполное,  $< 100\%$ , и степень поглощения лучей различной длины волны одинакова. Непоглощенные лучи серое тело отражает. Серые тела различаются способностью поглощения лучистой энергии, степенью черноты  $\varepsilon$  (относительным коэффициентом излучения);

д) цветное тело или селективное обладает способностью поглощать и отражать лучи различной длины волны по-разному;

е) тело с монохроматической лучеиспускательной способностью излучает лучи в узком диапазоне длин волн.

Всякое тело излучает энергию и в то же время отражает лучи, падающие на него от излучения окружающих тел. Фактически мы замеряем приборами и ощущаем суммарное, а не собственное излучение тела. Это фактическое излучение тела, состоящее из собственного и отраженного излучения, называется эффективным излучением. Так как падающее из-

лучение определяется температурой и свойствами окружающих тел, то физические качества собственного и отраженного излучения не одинаковы, их спектры различны. Однако для тепловых расчетов это различие не имеет значения, поскольку в теплопередаче рассматривается лишь энергетическая сторона процесса.

**Закон Кирхгофа.** Отношение лучеиспускательной способности к поглотительной для всех тел одинаково, равно лучеиспускательной способности абсолютно черного тела при той же температуре и зависит только от температуры:

$$\frac{E_1}{A_1} = \frac{E_2}{A_2} = \frac{E_3}{A_3} = \dots = \frac{E_0}{A_0} = E_0 = f(T);$$

$$\frac{C_1}{A_1} = \frac{C_2}{A_2} = \frac{C_3}{A_3} = \dots = C_0.$$

Для серых тел коэффициент  $A$  численно равен отношению  $A = \frac{E}{B_0} = \epsilon$ , называемому степенью черноты тела. Значения  $\epsilon$  для различных тел приведены в табл. XII-3, а значения степени черноты физических тел в лучах длиной волны 0,65 мкм — в табл. XII-4.

Таблица XII-3

Степень черноты  $\epsilon$  полного излучения различных материалов

| Материал и характер поверхности                    | Температура, °C | $\epsilon$  |
|----------------------------------------------------|-----------------|-------------|
| <b>Чистые и окисленные металлы</b>                 |                 |             |
| Алюминий:                                          |                 |             |
| полированный . . . . .                             | 225—575         | 0,039—0,057 |
| шероховатый . . . . .                              | 26              | 0,055       |
| окисленный при 600°C . . . . .                     | 200—600         | 0,11—0,19   |
| Покрытая алюминием поверхность:                    |                 |             |
| меди при нагреве до 600°C . . . . .                | 200—600         | 0,18—0,19   |
| стали при нагреве до 600°C . . . . .               | 200—600         | 0,52—0,57   |
| Вольфрам . . . . .                                 | 230—2230        | 0,053—0,31  |
| Вольфрамовая нить . . . . .                        | 3300            | 0,39        |
| Вольфрамовая нить, бывшая в употреблении . . . . . | 25—3300         | 0,032—0,35  |
| Железо:                                            |                 |             |
| электролитное, тщательно полированное . . . . .    | 175—225         | 0,052—0,064 |
| сварочное, тщательно полированное . . . . .        | 40—250          | 0,28        |
| полированное . . . . .                             | 425—1020        | 0,144—0,377 |
| свежеобработанное наждаком . . . . .               | 20              | 0,242       |
| окисленное гладкое . . . . .                       | 125—525         | 0,78—0,82   |
| литое необработанное . . . . .                     | 925—1115        | 0,87—0,95   |
| Стальное литье полированное . . . . .              | 770—1040        | 0,52—0,56   |
| Сталь:                                             |                 |             |
| листовая шлифованная . . . . .                     | 940—1110        | 0,52—0,61   |
| окисленная при 600°C . . . . .                     | 200—600         | 0,79—0,69   |
| листовая с плотным блестящим слоем окиси . . . . . | 25              | 0,82        |
| окисленная шероховатая . . . . .                   | 40—370          | 0,94—0,97   |
| мягкая расплавленная . . . . .                     | 1600—1800       | 0,28        |
| Чугун:                                             |                 |             |
| полированный . . . . .                             | 200             | 0,21        |
| обточенный . . . . .                               | 830—990         | 0,60—0,70   |
| окисленный при 600°C . . . . .                     | 200—600         | 0,64—0,78   |
| шероховатый, сильно окисленный . . . . .           | 40—250          | 0,95        |
| расплавленный . . . . .                            | 1300—1400       | 0,29        |
| Золото, тщательно полированное . . . . .           | 225—625         | 0,018—0,035 |
| Латунь тщательно полированная состава, %           |                 |             |
| (вес.):                                            |                 |             |
| 73,2% Cu, 26,7% Zn . . . . .                       | 245—355         | 0,028—0,031 |
| 62,4% Cu, 36,8% Zn, 0,4% Pb, 0,3% Al . . . . .     | 255—375         | 0,039—0,037 |
| 82,9% Cu, 17,0% Zn . . . . .                       | 275             | 0,030       |

| Материал и характер поверхности                                                | Температура, °C | $\epsilon$    |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------|
| прокатанная с естественной поверхностью                                        | 22              | 0,06          |
| прокатанная, тертая грубым наджаком                                            | 22              | 0,20          |
| тусклая                                                                        | 50—350          | 0,22          |
| окисленная при нагреве до 600°C                                                | 200—600         | 0,61—0,59     |
| Медь:                                                                          |                 |               |
| тщательно полированная электролитная                                           | 80              | 0,018         |
| полированная                                                                   | 115             | 0,023         |
| шабренная до блеска, но не зеркальная                                          | 22              | 0,072         |
| окисленная при нагреве до 600°C                                                | 200—600         | 0,57—0,55     |
| продолжительно нагревавшаяся, покрытая толстым слоем окиси                     | 25              | 0,78          |
| расплавленная                                                                  | 1075—1275       | 0,11—0,13     |
| Молибденовая нить                                                              | 725—2600        | 0,096—0,292   |
| Никель:                                                                        |                 |               |
| нанесенный гальваническим способом на полированное железо и затем полированный | 23              | 0,045         |
| технически чистый полированный                                                 | 225—375         | 0,07—0,087    |
| окисленный при нагреве до 600°C                                                | 200—600         | 0,11          |
| Никелевая проволока                                                            | 185—1000        | 0,096—0,186   |
| Хромоникель                                                                    | 52—1035         | 0,64—0,76     |
| Олово, блестящее луженое листовое железо                                       | 25              | 0,043—0,064   |
| Платина чистая полированная                                                    | 225—625         | 0,054—0,104   |
| Платиновая лента                                                               | 925—1115        | 0,12—0,17     |
| Платиновая нить                                                                | 25—1230         | 0,036—0,192   |
| Платиновая проволока                                                           | 225—1375        | 0,073—0,182   |
| Ртуть очень чистая                                                             | 0—100           | 0,09—0,12     |
| Свинец:                                                                        |                 |               |
| чистый неокисленный                                                            | 125—225         | 0,057—0,075   |
| серный окисленный                                                              | 24              | 0,281         |
| окисленный при 200°C                                                           | 200             | 0,63          |
| Серебро:                                                                       |                 |               |
| полированное чистое                                                            | 225—625         | 0,0198—0,0324 |
| полированное                                                                   | 38—370          | 0,0221—0,0312 |
| Хром                                                                           | 38—538          | 0,08—0,26     |
| Цинк:                                                                          |                 |               |
| торговый (99,1%) полированный                                                  | 225—325         | 0,045—0,053   |
| окисленный при нагреве до 400°C                                                | 400             | 0,11          |
| Оцинкованное листовое железо:                                                  |                 |               |
| очень блестящее                                                                | 28              | 0,228         |
| серое окисленное                                                               | 24              | 0,276         |
| <i>Огнеупорные, строительные, термоизоляционные и другие материалы</i>         |                 |               |
| Асбестовый картон                                                              | 24              | 0,96          |
| Асбестовая бумага                                                              | 40—370          | 0,93—0,95     |
| Асбошифер                                                                      | 20              | 0,96          |
| Динасовый кирпич:                                                              |                 |               |
| неглазурованный шероховатый                                                    | 1000            | 0,8           |
| глазурованный шероховатый                                                      | 1100            | 0,85          |
| Кирпич:                                                                        |                 |               |
| шамотный глазурованный                                                         | 1100            | 0,75          |
| магнезитовый (80% MgO, 9% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )                     | 1500            | 0,39          |
| силикатный (95% SiO <sub>2</sub> )                                             | 1230            | 0,66          |
| силлиманитовый (33% SiO <sub>2</sub> , 64% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )    | 1500            | 0,29          |
| красный шероховатый                                                            | 20              | 0,93          |
| шамот (55% SiO <sub>2</sub> , 41% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )             | 1230            | 0,59          |
| Фарфор глазурованный                                                           | 22              | 0,92          |
| Гипс                                                                           | 20              | 0,8—0,9       |
| Штукатурка шероховатая известковая                                             | 10—90           | 0,91          |
| Мрамор сероватый полированный                                                  | 22              | 0,93          |
| Кварц плавленый шероховатый                                                    | 20              | 0,93          |
| Стекло гладкое                                                                 | 22              | 0,94          |
| Бумага                                                                         | 20              | 0,8—0,9       |

| Материал и характер поверхности                           | Температура, °C | $\varepsilon$ |
|-----------------------------------------------------------|-----------------|---------------|
| Вода . . . . .                                            | 0—100           | 0,95—0,96     |
| Дерево строганое . . . . .                                | 20              | 0,8—0,9       |
| Ламповая сажа, слой 0,075 мм . . . . .                    | 40—370          | 0,95          |
| Обмазка из жидкого стекла с ламповой сажой . . . . .      | 100—225         | 0,96—0,95     |
| Резина:                                                   |                 |               |
| твердая лощеная . . . . .                                 | 23              | 0,95          |
| мягкая серая шероховатая . . . . .                        | 24              | 0,86          |
| Толь кровельный . . . . .                                 | 20              | 0,93          |
| Уголь очищенный (0,9% золы) . . . . .                     | 125—625         | 0,81—0,79     |
| Угольная нить . . . . .                                   | 1040—1405       | 0,53          |
| Эмаль белая, припавленная к железу . . . . .              | 19              | 0,9           |
| Лак:                                                      |                 |               |
| белый эмалевый на железной шероховатой пластине . . . . . | 23              | 0,91          |
| черный блестящий, распыленный по железу . . . . .         | 25              | 0,88          |
| черный матовый . . . . .                                  | 40—95           | 0,96—0,98     |
| белый . . . . .                                           | 40—95           | 0,80—0,95     |
| Шеллак:                                                   |                 |               |
| черный блестящий на луженом железе . . . . .              | 21              | 0,82          |
| черный матовый . . . . .                                  | 75—145          | 0,91          |
| Масляные краски различных цветов . . . . .                | 100             | 0,96—0,86     |
| Алюминиевые краски:                                       |                 |               |
| разной давности с переменным содержанием Al . . . . .     | 100             | 0,27—0,67     |
| после нагрева до 325°C . . . . .                          | 150—315         | 0,35          |
| Алюминиевый лак по шероховатой пластине . . . . .         | 20              | 0,39          |

Примечания: 1. Степени черноты, приведенные в таблице, получены путем измерения яркости излучения в направлении нормали к поверхности тела.

2. Две температуры и две степени черноты, указанные для некоторых материалов, означают, что первая степень черноты относится к первой температуре, а вторая — ко второй, причем допускается линейная интерполяция.

Таблица XII-4

Степень черноты физических тел в лучах длиной волны 0,65 мкм

| Материал и характер поверхности                | Температура, °C | $\varepsilon=0,65$ мкм | Материал и характер поверхности                                | Температура, °C | $\varepsilon=0,65$ мкм |
|------------------------------------------------|-----------------|------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------|------------------------|
| Серебро . . . . .                              | —               | 0,07                   | Железо:                                                        |                 |                        |
| Золото:                                        |                 |                        | неокисленное                                                   |                 |                        |
| твердое . . . . .                              | —               | 0,13                   | жидкое . . . . .                                               | 3000            | 0,41                   |
| жидкое . . . . .                               | —               | 0,22                   |                                                                | —               | 0,37                   |
| Медь:                                          |                 |                        |                                                                | —               | 0,40                   |
| твердая неокисленная . . . . .                 | —               | 0,11                   | окисленное . . . . .                                           | 800             | 0,98                   |
| жидкая неокисленная . . . . .                  | —               | 0,15                   |                                                                | 1000            | 0,95                   |
| Платина:                                       |                 |                        |                                                                | 1200            | 0,92                   |
| твердая . . . . .                              | —               | 0,33                   | Окисленная специальная сталь . . . . .                         | 850—1100        | 0,80                   |
| жидкая . . . . .                               | —               | 0,38                   | Углеродистая неокисленная сталь в атмосфере водорода . . . . . | 800—1100        | 0,80                   |
| Палладий:                                      |                 |                        | Окисленный никель . . . . .                                    | 850—1100        | 0,44                   |
| твердый . . . . .                              | —               | 0,33                   |                                                                | 800             | 0,96                   |
| жидкий . . . . .                               | —               | 0,37                   |                                                                | 1300            | 0,85                   |
| Никель твердый и жидкий неокисленный . . . . . | —               | 0,36                   | Окисленная медь . . . . .                                      | —               | 0,70                   |
| Иридий и родий . . . . .                       | —               | 0,30                   | Окисленный нихром . . . . .                                    | 600             | 0,95                   |
| Тантал неокисленный . . . . .                  | 1100            | 0,60                   | То же . . . . .                                                | 900             | 0,90                   |
| Вольфрам неокисленный . . . . .                | 1000            | 0,46                   | » » . . . . .                                                  | 1200            | 0,80                   |
| То же . . . . .                                | 2000            | 0,43                   | Жидкий чугун, светлые места (окислы) . . . . .                 | 1100—1300       | 0,9—0,95               |
|                                                |                 |                        | То же . . . . .                                                | —               | 0,7                    |

| Материал и характер поверхности                               | Температура, °C | $\epsilon=0,65$ мкм | Материал и характер поверхности             | Температура, °C | $\epsilon=0,65$ мкм |
|---------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------|---------------------------------------------|-----------------|---------------------|
| Жидкий чугун, темные пятна (свободные от окислов)             | $>1375$         | 0,4                 | Свинцовая ванна: + шлаки                    | 900             | 1,0                 |
| Жидкая окисленная нержавеющая хромовая и хромоникелевая сталь | —               | 0,7—0,75            | чистое зеркало                              | —               | 0,5—0,6             |
| Жидкая окисленная хромоникелевая сталь                        | —               | 0,9                 | Соляная ванна                               | 700—1400        | 0,8                 |
| Жидкие шлаки                                                  | —               | 0,65                | Графит в порошке                            | —               | 0,95                |
| То же                                                         | 1300            | 0,9—1,0             | Уголь                                       | —               | 0,85                |
|                                                               | 1300—1500       | 0,9                 | Оксид алюминия — гладкопрессованный порошок | —               | 0,14                |
|                                                               |                 |                     | Фарфор                                      | —               | 0,25—0,50           |
|                                                               |                 |                     | Шамот                                       | —               | 0,7—0,8             |
|                                                               |                 |                     | Карборунд                                   | —               | 0,8                 |

**Закон Планка.** Изменения интенсивности излучения (или распределения энергии) по длинам волн для абсолютно черного тела ( $I_{0\lambda}$ ) описываются выражением

$$I_{0\lambda} = \frac{C_1 \cdot \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{м)},$$

где  $\lambda$  — длина волны, м;

$T$  — абсолютная температура, К;

$e$  — основание натуральных логарифмов;

$C_1$  — постоянная, равная  $3,69 \cdot 10^{-16}$  Вт/м<sup>6</sup>;

$C_2$  — постоянная, равная  $1,44 \cdot 10^{-2}$  м·К.

$$C_1 = 3,7413 \cdot 10^{-16} \text{ Вт/м}^2;$$

$$C_2 = 1,438 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К};$$

Зависимость интенсивности излучения абсолютно черного тела от температуры и длины волны показана на рис. 145.

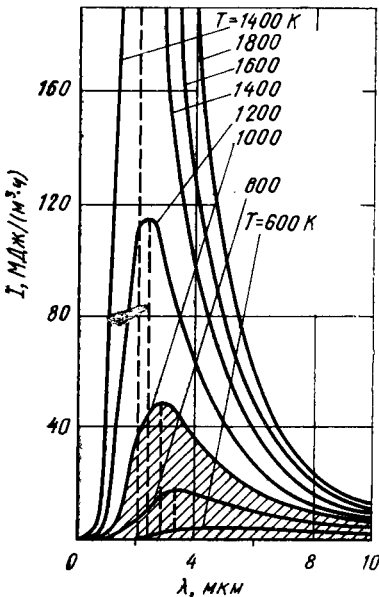


Рис. 145. Зависимость интенсивности излучения  $I$  абсолютно черного тела от длины волны  $\lambda$  и температуры  $t$

**Закон Стефана—Больцмана** гласит, что энергия излучения абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры:

$$E_0 = \int_0^{\infty} I_{0\lambda} d\lambda = \sigma_0 T^4 = C_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4 \text{ Вт/м}^2.$$

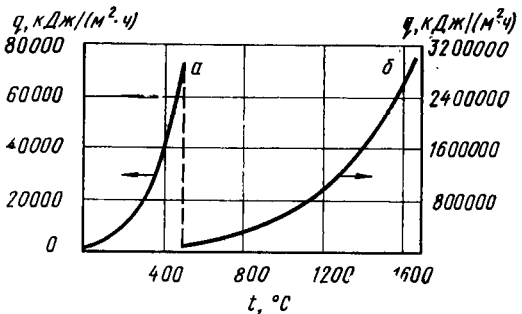


Рис. 146. Излучение абсолютно черного тела. Пользоваться: а — левой шкалой; б — правой шкалой

Здесь  $\sigma_0$  — константа излучения абсолютно черного тела, равная  $5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) и  $C_0$  — коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела  $C_0 = \sigma_0 \cdot 10^8 = 5,67$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

График изменения  $E_0 = f(T)$  представлен на рис. 146; числовые значения приведены в табл. XII-5.

Таблица XII-5

Значения  $\left(\frac{T}{100}\right)^3$ ,  $\left(\frac{T}{100}\right)^4$  и  $5,67 \left(\frac{T}{100}\right)^4$  при различных температурах

| Температура, °C | T   | $\left(\frac{T}{100}\right)^3$ | $\left(\frac{T}{100}\right)^4$ | $5,67 \times \left(\frac{T}{100}\right)^4$ | Температура, °C | T   | $\left(\frac{T}{100}\right)^3$ | $\left(\frac{T}{100}\right)^4$ | $5,67 \times \left(\frac{T}{100}\right)^4$ |
|-----------------|-----|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------|-----------------|-----|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------|
| 0               | 273 | 20,356                         | 55,572                         | 315,02                                     | 505             | 778 | 470,91                         | 3663,7                         | 20768,4                                    |
| 10              | 283 | 22,665                         | 64,142                         | 363,60                                     | 510             | 783 | 480,05                         | 3758,8                         | 21307,5                                    |
| 20              | 293 | 25,154                         | 73,701                         | 417,79                                     | 515             | 788 | 489,30                         | 3855,6                         | 21856,2                                    |
| 30              | 303 | 27,818                         | 84,289                         | 477,81                                     | 520             | 793 | 498,68                         | 3954,5                         | 22416,9                                    |
| 40              | 313 | 30,665                         | 95,981                         | 544,09                                     | 525             | 798 | 508,17                         | 4055,2                         | 22987,7                                    |
| 50              | 323 | 33,699                         | 108,85                         | 617,04                                     | 530             | 803 | 517,78                         | 4157,8                         | 23569,3                                    |
| 60              | 333 | 36,928                         | 122,96                         | 697,02                                     | 535             | 808 | 527,51                         | 4262,3                         | 24161,7                                    |
| 70              | 343 | 40,354                         | 138,41                         | 784,60                                     | 540             | 813 | 537,37                         | 4368,8                         | 24765,4                                    |
| 80              | 353 | 43,984                         | 155,26                         | 880,12                                     | 545             | 818 | 547,34                         | 4477,2                         | 25379,9                                    |
| 90              | 363 | 47,843                         | 173,67                         | 984,48                                     | 550             | 823 | 557,43                         | 4587,6                         | 26005,7                                    |
| 100             | 373 | 51,884                         | 193,53                         | 1097,06                                    | 555             | 828 | 567,66                         | 4700,2                         | 26644,0                                    |
| 110             | 383 | 56,182                         | 215,18                         | 1219,79                                    | 560             | 833 | 578,01                         | 4814,8                         | 27293,7                                    |
| 120             | 393 | 60,698                         | 238,54                         | 1352,21                                    | 565             | 838 | 588,48                         | 4931,5                         | 27955,2                                    |
| 130             | 403 | 65,451                         | 263,77                         | 1495,23                                    | 570             | 843 | 599,08                         | 5050,2                         | 28628,1                                    |
| 140             | 413 | 70,616                         | 291,64                         | 1653,22                                    | 575             | 848 | 609,80                         | 5171,1                         | 29313,4                                    |
| 150             | 423 | 75,687                         | 320,16                         | 1814,89                                    | 580             | 853 | 620,65                         | 5294,1                         | 30010,7                                    |
| 160             | 433 | 81,180                         | 351,51                         | 1992,60                                    | 585             | 858 | 631,63                         | 5419,4                         | 30721,0                                    |
| 170             | 443 | 86,940                         | 385,14                         | 2183,24                                    | 590             | 863 | 642,74                         | 5546,8                         | 31443,1                                    |
| 180             | 453 | 92,960                         | 421,11                         | 2387,15                                    | 595             | 868 | 653,97                         | 5676,5                         | 32178,4                                    |
| 190             | 463 | 99,253                         | 459,54                         | 2604,99                                    | 600             | 873 | 665,34                         | 5808,4                         | 32926,1                                    |
| 200             | 473 | 105,82                         | 500,53                         | 2837,35                                    | 605             | 878 | 676,84                         | 5942,7                         | 33687,4                                    |
| 210             | 483 | 112,68                         | 544,24                         | 3085,13                                    | 610             | 883 | 688,47                         | 6079,2                         | 34461,2                                    |
| 220             | 493 | 119,82                         | 590,71                         | 3348,56                                    | 615             | 888 | 700,23                         | 6218,0                         | 35248,0                                    |
| 230             | 503 | 127,26                         | 640,12                         | 3629,65                                    | 620             | 893 | 712,12                         | 6359,2                         | 36048,4                                    |
| 240             | 513 | 135,01                         | 692,60                         | 3926,14                                    | 625             | 898 | 724,15                         | 6502,9                         | 36863,0                                    |
| 250             | 523 | 143,06                         | 748,20                         | 4241,32                                    | 630             | 903 | 736,31                         | 6648,8                         | 37690,1                                    |
| 260             | 533 | 151,42                         | 807,07                         | 4575,04                                    | 635             | 908 | 748,61                         | 6797,3                         | 38531,9                                    |
| 270             | 543 | 160,10                         | 869,34                         | 4928,03                                    | 640             | 913 | 761,05                         | 6948,4                         | 39388,4                                    |
| 280             | 553 | 169,11                         | 935,18                         | 5301,25                                    | 645             | 918 | 773,62                         | 7101,8                         | 40258,0                                    |
| 290             | 563 | 178,45                         | 1004,7                         | 5695,3                                     | 650             | 923 | 786,33                         | 7257,8                         | 41142,3                                    |
| 300             | 573 | 188,13                         | 1078,0                         | 6110,9                                     | 655             | 928 | 799,18                         | 7416,4                         | 42041,3                                    |
| 310             | 583 | 198,16                         | 1155,3                         | 6549,0                                     | 660             | 933 | 812,17                         | 7577,5                         | 42954,6                                    |
| 320             | 593 | 208,53                         | 1236,6                         | 7009,9                                     | 665             | 938 | 825,29                         | 7741,2                         | 43882,5                                    |
| 330             | 603 | 219,26                         | 1322,1                         | 7494,6                                     | 670             | 943 | 838,56                         | 7907,6                         | 44825,8                                    |
| 340             | 613 | 230,35                         | 1412,0                         | 8004,2                                     | 675             | 948 | 851,97                         | 8076,7                         | 45784,4                                    |
| 350             | 623 | 241,80                         | 1506,4                         | 8539,3                                     | 680             | 953 | 865,52                         | 8248,4                         | 46757,7                                    |
| 360             | 633 | 253,64                         | 1605,5                         | 9101,1                                     | 685             | 958 | 879,22                         | 8422,9                         | 47746,9                                    |
| 370             | 643 | 265,85                         | 1709,4                         | 9690,1                                     | 690             | 963 | 893,06                         | 8600,1                         | 48751,4                                    |
| 380             | 653 | 278,44                         | 1818,2                         | 10306,8                                    | 695             | 968 | 907,04                         | 8780,1                         | 49771,8                                    |
| 390             | 663 | 291,45                         | 1932,3                         | 10956,5                                    | 700             | 973 | 921,17                         | 8963,0                         | 50808,6                                    |
| 400             | 673 | 304,80                         | 2051,3                         | 11628,2                                    | 705             | 978 | 935,34                         | 9148,1                         | 51861,3                                    |
| 410             | 683 | 318,61                         | 2176,1                         | 12335,7                                    | 710             | 983 | 949,65                         | 9335,7                         | 52929,8                                    |
| 420             | 693 | 332,81                         | 2306,4                         | 13074,3                                    | 715             | 988 | 964,11                         | 9526,9                         | 54013,9                                    |
| 430             | 703 | 347,43                         | 2442,4                         | 13845,2                                    | 720             | 993 | 978,74                         | 9722,5                         | 55113,9                                    |
| 440             | 713 | 362,47                         | 2584,4                         | 14650,2                                    | 725             |     |                                |                                |                                            |
| 450             | 723 | 377,93                         | 2732,4                         | 15489,2                                    | 730             |     |                                |                                |                                            |
| 460             | 733 | 393,83                         | 2886,8                         | 16364,4                                    | 735             |     |                                |                                |                                            |
| 470             | 743 | 410,17                         | 3047,6                         | 17275,9                                    | 740             |     |                                |                                |                                            |
| 480             | 753 | 426,96                         | 3215,0                         | 18224,9                                    | 745             |     |                                |                                |                                            |
| 490             | 763 | 444,19                         | 3389,2                         | 19212,4                                    | 750             |     |                                |                                |                                            |
| 500             | 773 | 461,89                         | 3570,4                         | 20239,5                                    | 755             |     |                                |                                |                                            |

Продолжение табл. XII-5

| Темпе-<br>ратура,<br>°C | T    | $\left(\frac{T}{100}\right)^*$ | $\left(\frac{T}{100}\right)^*$ | $5,67 \times$<br>$\times \left(\frac{T}{100}\right)^*$ | Темпе-<br>ратура,<br>°C | T    | $\left(\frac{T}{100}\right)^*$ | $\left(\frac{T}{100}\right)^*$ | $5,67 \times$<br>$\times \left(\frac{T}{100}\right)^*$ |
|-------------------------|------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------|------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 722                     | 995  | 985,05                         | 9801,2                         | 55560,1                                                | 842                     | 1115 | 1386,2                         | 15456                          | 87615,4                                                |
| 724                     | 997  | 991,02                         | 9880,5                         | 56009,6                                                | 844                     | 1117 | 1393,7                         | 15568                          | 88250,3                                                |
| 726                     | 999  | 997,00                         | 9960,0                         | 56460,3                                                | 846                     | 1119 | 1401,2                         | 15679                          | 88879,5                                                |
| 728                     | 1001 | 1003,0                         | 10040                          | 56913,7                                                | 848                     | 1121 | 1408,7                         | 15792                          | 89520,1                                                |
| 730                     | 1003 | 1009,0                         | 10120                          | 57367,0                                                | 850                     | 1123 | 1416,2                         | 15904                          | 90155,0                                                |
| 732                     | 1005 | 1015,1                         | 10202                          | 57832,1                                                | 852                     | 1125 | 1423,8                         | 16018                          | 90801,2                                                |
| 734                     | 1007 | 1021,1                         | 10282                          | 58285,6                                                | 854                     | 1127 | 1431,4                         | 16132                          | 91447,5                                                |
| 736                     | 1009 | 1027,2                         | 10364                          | 58750,4                                                | 856                     | 1129 | 1439,1                         | 16247                          | 92099,4                                                |
| 738                     | 1011 | 1033,4                         | 10448                          | 59226,4                                                | 858                     | 1131 | 1446,7                         | 16362                          | 92751,3                                                |
| 740                     | 1013 | 1039,5                         | 10530                          | 59691,4                                                | 860                     | 1133 | 1454,4                         | 16478                          | 93408,8                                                |
| 742                     | 1015 | 1045,7                         | 10614                          | 60167,4                                                | 862                     | 1135 | 1462,1                         | 16594                          | 94066,4                                                |
| 744                     | 1017 | 1051,9                         | 10698                          | 60643,8                                                | 864                     | 1137 | 1469,9                         | 16713                          | 94741,0                                                |
| 746                     | 1019 | 1058,1                         | 10782                          | 61119,8                                                | 866                     | 1139 | 1477,6                         | 16830                          | 95404,2                                                |
| 748                     | 1021 | 1064,3                         | 10867                          | 61601,8                                                | 868                     | 1141 | 1485,4                         | 16948                          | 96073,1                                                |
| 750                     | 1023 | 1070,6                         | 10952                          | 62083,6                                                | 870                     | 1143 | 1493,3                         | 17068                          | 96753,4                                                |
| 752                     | 1025 | 1076,9                         | 11038                          | 62571,1                                                | 872                     | 1145 | 1501,1                         | 17188                          | 97433,6                                                |
| 754                     | 1027 | 1083,2                         | 11124                          | 63058,6                                                | 874                     | 1147 | 1509,0                         | 17308                          | 98113,9                                                |
| 756                     | 1029 | 1089,5                         | 11211                          | 63551,8                                                | 876                     | 1149 | 1516,9                         | 17429                          | 98799,8                                                |
| 758                     | 1031 | 1096,0                         | 11300                          | 64056,3                                                | 878                     | 1151 | 1524,8                         | 17550                          | 99485,7                                                |
| 760                     | 1033 | 1102,3                         | 11387                          | 64549,5                                                | 880                     | 1153 | 1532,8                         | 17673                          | 100183                                                 |
| 762                     | 1035 | 1108,7                         | 11475                          | 65048,3                                                | 882                     | 1155 | 1540,8                         | 17796                          | 100880                                                 |
| 764                     | 1037 | 1115,2                         | 11564                          | 65552,8                                                | 884                     | 1157 | 1548,8                         | 17920                          | 101583                                                 |
| 766                     | 1039 | 1121,6                         | 11653                          | 66057,4                                                | 886                     | 1159 | 1556,9                         | 18044                          | 102286                                                 |
| 768                     | 1041 | 1128,1                         | 11744                          | 66573,2                                                | 888                     | 1161 | 1564,9                         | 18168                          | 102989                                                 |
| 770                     | 1043 | 1134,6                         | 11834                          | 67083,4                                                | 890                     | 1163 | 1573,0                         | 18294                          | 103703                                                 |
| 772                     | 1045 | 1141,1                         | 11924                          | 67593,6                                                | 892                     | 1165 | 1581,2                         | 18421                          | 104423                                                 |
| 774                     | 1047 | 1147,7                         | 12016                          | 68115,1                                                | 894                     | 1167 | 1589,3                         | 18547                          | 105137                                                 |
| 776                     | 1049 | 1154,3                         | 12109                          | 68642,3                                                | 896                     | 1169 | 1597,5                         | 18675                          | 105863                                                 |
| 778                     | 1051 | 1160,9                         | 12201                          | 69163,8                                                | 898                     | 1171 | 1605,7                         | 18803                          | 106589                                                 |
| 780                     | 1053 | 1167,6                         | 12294                          | 69691,0                                                | 900                     | 1173 | 1613,9                         | 18931                          | 107314                                                 |
| 782                     | 1055 | 1174,2                         | 12388                          | 70223,9                                                | 902                     | 1175 | 1622,2                         | 19061                          | 108051                                                 |
| 784                     | 1057 | 1180,9                         | 12482                          | 70756,7                                                | 904                     | 1177 | 1630,5                         | 19191                          | 108788                                                 |
| 786                     | 1059 | 1187,6                         | 12577                          | 71295,2                                                | 906                     | 1179 | 1638,9                         | 19323                          | 109536                                                 |
| 788                     | 1061 | 1194,4                         | 12673                          | 71839,4                                                | 908                     | 1181 | 1647,2                         | 19453                          | 110273                                                 |
| 790                     | 1063 | 1201,2                         | 12768                          | 72378,0                                                | 910                     | 1183 | 1655,6                         | 19586                          | 111027                                                 |
| 792                     | 1065 | 1207,9                         | 12864                          | 72922,2                                                | 912                     | 1185 | 1664,0                         | 19718                          | 111775                                                 |
| 794                     | 1067 | 1214,8                         | 12962                          | 73477,7                                                | 914                     | 1187 | 1672,4                         | 19851                          | 112529                                                 |
| 796                     | 1069 | 1221,6                         | 13059                          | 74027,6                                                | 916                     | 1189 | 1680,9                         | 19986                          | 113295                                                 |
| 798                     | 1071 | 1228,5                         | 13157                          | 74583,1                                                | 918                     | 1191 | 1689,4                         | 20121                          | 114060                                                 |
| 800                     | 1073 | 1235,4                         | 13256                          | 75144,3                                                | 920                     | 1193 | 1697,3                         | 20249                          | 114786                                                 |
| 802                     | 1075 | 1242,3                         | 13354                          | 75699,8                                                | 922                     | 1195 | 1706,5                         | 20393                          | 115602                                                 |
| 804                     | 1077 | 1249,2                         | 13453                          | 76261,0                                                | 924                     | 1197 | 1715,1                         | 20530                          | 116378                                                 |
| 806                     | 1079 | 1256,2                         | 13554                          | 76833,6                                                | 926                     | 1199 | 1723,7                         | 20667                          | 117155                                                 |
| 808                     | 1081 | 1263,2                         | 13655                          | 77406,1                                                | 928                     | 1201 | 1732,3                         | 20805                          | 117936                                                 |
| 810                     | 1083 | 1270,2                         | 13756                          | 77978,6                                                | 930                     | 1203 | 1741,0                         | 20944                          | 118725                                                 |
| 812                     | 1085 | 1277,3                         | 13858                          | 78556,8                                                | 932                     | 1205 | 1749,7                         | 21084                          | 119519                                                 |
| 814                     | 1087 | 1284,4                         | 13961                          | 79140,7                                                | 934                     | 1207 | 1758,4                         | 21224                          | 120312                                                 |
| 816                     | 1089 | 1291,5                         | 14064                          | 79724,6                                                | 936                     | 1209 | 1767,2                         | 21365                          | 121112                                                 |
| 818                     | 1091 | 1298,6                         | 14167                          | 80308,5                                                | 938                     | 1211 | 1776,0                         | 21507                          | 121917                                                 |
| 820                     | 1093 | 1305,8                         | 14272                          | 80903,7                                                | 940                     | 1213 | 1784,8                         | 21649                          | 122722                                                 |
| 822                     | 1095 | 1312,9                         | 14376                          | 81493,2                                                | 942                     | 1215 | 1793,6                         | 21792                          | 123532                                                 |
| 824                     | 1097 | 1320,1                         | 14481                          | 82088,4                                                | 944                     | 1217 | 1802,5                         | 21936                          | 124348                                                 |
| 826                     | 1099 | 1327,4                         | 14588                          | 82695,0                                                | 946                     | 1219 | 1811,4                         | 22081                          | 125171                                                 |
| 828                     | 1101 | 1334,6                         | 14694                          | 83295,9                                                | 948                     | 1221 | 1820,3                         | 22226                          | 125993                                                 |
| 830                     | 1103 | 1341,0                         | 14801                          | 83902,4                                                | 950                     | 1223 | 1829,3                         | 22372                          | 126820                                                 |
| 832                     | 1105 | 1349,2                         | 14909                          | 84514,6                                                | 952                     | 1225 | 1838,3                         | 22519                          | 127653                                                 |
| 834                     | 1107 | 1356,6                         | 15018                          | 85132,5                                                | 954                     | 1227 | 1847,3                         | 22666                          | 128487                                                 |
| 836                     | 1109 | 1363,9                         | 15126                          | 85744,8                                                | 956                     | 1229 | 1856,3                         | 22814                          | 129326                                                 |
| 838                     | 1111 | 1371,3                         | 15235                          | 86362,6                                                | 958                     | 1231 | 1865,4                         | 22963                          | 130170                                                 |
| 840                     | 1113 | 1378,7                         | 15345                          | 86986,2                                                | 960                     | 1233 | 1874,5                         | 23113                          | 131021                                                 |

| Темпе-<br>ратура,<br>°C | $T$  | $\left(\frac{T}{100}\right)^3$ | $\left(\frac{T}{100}\right)^4$ | $5,67 \times$<br>$\times \left(\frac{T}{100}\right)^5$ | Темпе-<br>ратура,<br>°C | $T$  | $\left(\frac{T}{100}\right)^3$ | $\left(\frac{T}{100}\right)^4$ | $5,67 \times$<br>$\times \left(\frac{T}{100}\right)^5$ |
|-------------------------|------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------|------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 962                     | 1235 | 1883,7                         | 23264                          | 131877                                                 | 1082                    | 1355 | 2487,8                         | 33710                          | 191092                                                 |
| 964                     | 1237 | 1892,8                         | 23414                          | 132727                                                 | 1084                    | 1357 | 2498,8                         | 33908                          | 192214                                                 |
| 966                     | 1239 | 1902,0                         | 23566                          | 133589                                                 | 1086                    | 1359 | 2509,9                         | 34109                          | 193354                                                 |
| 968                     | 1241 | 1911,2                         | 23718                          | 134750                                                 | 1088                    | 1361 | 2521,0                         | 34311                          | 194499                                                 |
| 970                     | 1243 | 1920,5                         | 23872                          | 135323                                                 | 1090                    | 1363 | 2532,1                         | 34512                          | 195638                                                 |
| 972                     | 1245 | 1929,8                         | 24026                          | 136196                                                 | 1092                    | 1365 | 2543,3                         | 34716                          | 196796                                                 |
| 974                     | 1247 | 1939,1                         | 24181                          | 137075                                                 | 1094                    | 1367 | 2554,5                         | 34920                          | 197951                                                 |
| 976                     | 1249 | 1948,4                         | 24336                          | 137953                                                 | 1096                    | 1369 | 2565,7                         | 35124                          | 199107                                                 |
| 978                     | 1251 | 1957,8                         | 24492                          | 138838                                                 | 1098                    | 1371 | 2576,9                         | 35329                          | 200270                                                 |
| 980                     | 1253 | 1967,2                         | 24649                          | 139728                                                 | 1100                    | 1373 | 2588,3                         | 35537                          | 201449                                                 |
| 982                     | 1255 | 1976,7                         | 24808                          | 140629                                                 | 1102                    | 1375 | 2599,6                         | 35745                          | 202628                                                 |
| 984                     | 1257 | 1986,1                         | 24965                          | 141519                                                 | 1104                    | 1377 | 2611,0                         | 35953                          | 203807                                                 |
| 986                     | 1259 | 1995,6                         | 25125                          | 142426                                                 | 1106                    | 1379 | 2622,4                         | 36163                          | 204997                                                 |
| 988                     | 1261 | 2005,1                         | 25285                          | 143327                                                 | 1108                    | 1381 | 2633,8                         | 36373                          | 206188                                                 |
| 990                     | 1263 | 2014,7                         | 25446                          | 144246                                                 | 1110                    | 1383 | 2645,2                         | 36583                          | 207378                                                 |
| 992                     | 1265 | 2024,3                         | 25607                          | 145158                                                 | 1112                    | 1385 | 2656,7                         | 36795                          | 208580                                                 |
| 994                     | 1267 | 2033,9                         | 25770                          | 146082                                                 | 1114                    | 1387 | 2668,3                         | 37009                          | 209793                                                 |
| 996                     | 1269 | 2043,5                         | 25932                          | 147001                                                 | 1116                    | 1389 | 2679,8                         | 37222                          | 211000                                                 |
| 998                     | 1272 | 2053,2                         | 26096                          | 147930                                                 | 1118                    | 1391 | 2691,4                         | 37437                          | 212219                                                 |
| 1000                    | 1273 | 2062,9                         | 26261                          | 148866                                                 | 1120                    | 1393 | 2703,0                         | 37653                          | 213444                                                 |
| 1002                    | 1275 | 2072,6                         | 26426                          | 149801                                                 | 1122                    | 1395 | 2714,7                         | 37870                          | 214674                                                 |
| 1004                    | 1277 | 2082,4                         | 26592                          | 150742                                                 | 1124                    | 1397 | 2726,4                         | 38088                          | 215909                                                 |
| 1006                    | 1279 | 2092,2                         | 26759                          | 151689                                                 | 1126                    | 1399 | 2738,1                         | 38306                          | 217145                                                 |
| 1008                    | 1281 | 2102,1                         | 26928                          | 152647                                                 | 1128                    | 1401 | 2749,9                         | 38526                          | 218392                                                 |
| 1010                    | 1283 | 2111,9                         | 27096                          | 153599                                                 | 1130                    | 1403 | 2761,7                         | 38747                          | 219645                                                 |
| 1012                    | 1285 | 2121,8                         | 27265                          | 154557                                                 | 1132                    | 1405 | 2773,5                         | 38968                          | 220898                                                 |
| 1014                    | 1287 | 2131,8                         | 27436                          | 155526                                                 | 1134                    | 1407 | 2785,3                         | 39189                          | 222151                                                 |
| 1016                    | 1289 | 2141,7                         | 27607                          | 156496                                                 | 1136                    | 1409 | 2797,3                         | 39414                          | 223426                                                 |
| 1018                    | 1291 | 2151,7                         | 27778                          | 157465                                                 | 1138                    | 1411 | 2809,2                         | 39638                          | 224696                                                 |
| 1020                    | 1293 | 2161,6                         | 27949                          | 158434                                                 | 1140                    | 1413 | 2821,2                         | 39864                          | 225977                                                 |
| 1022                    | 1295 | 2171,7                         | 28124                          | 159427                                                 | 1142                    | 1415 | 2833,1                         | 40088                          | 227247                                                 |
| 1024                    | 1297 | 2181,8                         | 28298                          | 160413                                                 | 1144                    | 1417 | 2845,2                         | 40316                          | 228539                                                 |
| 1026                    | 1299 | 2191,9                         | 28473                          | 161405                                                 | 1146                    | 1419 | 2857,3                         | 40545                          | 229837                                                 |
| 1028                    | 1301 | 2202,1                         | 28649                          | 162403                                                 | 1148                    | 1421 | 2869,3                         | 40773                          | 231130                                                 |
| 1030                    | 1303 | 2212,2                         | 28825                          | 163400                                                 | 1150                    | 1423 | 2881,4                         | 41002                          | 232428                                                 |
| 1032                    | 1305 | 2222,4                         | 29002                          | 164404                                                 | 1152                    | 1425 | 2893,6                         | 41234                          | 233743                                                 |
| 1034                    | 1307 | 2232,7                         | 29181                          | 165418                                                 | 1154                    | 1427 | 2905,8                         | 41466                          | 235058                                                 |
| 1036                    | 1309 | 2242,9                         | 29360                          | 166433                                                 | 1156                    | 1429 | 2918,1                         | 41700                          | 236385                                                 |
| 1038                    | 1311 | 2253,2                         | 29539                          | 167448                                                 | 1158                    | 1431 | 2930,3                         | 41933                          | 237706                                                 |
| 1040                    | 1313 | 2263,6                         | 29721                          | 168479                                                 | 1160                    | 1433 | 2942,6                         | 42167                          | 239032                                                 |
| 1042                    | 1315 | 2273,9                         | 29902                          | 169505                                                 | 1162                    | 1435 | 2955,0                         | 42404                          | 240376                                                 |
| 1044                    | 1317 | 2284,3                         | 30084                          | 170537                                                 | 1164                    | 1437 | 2967,4                         | 42642                          | 241725                                                 |
| 1046                    | 1319 | 2294,7                         | 30267                          | 171575                                                 | 1166                    | 1439 | 2979,8                         | 42879                          | 243068                                                 |
| 1048                    | 1321 | 2305,2                         | 30452                          | 172623                                                 | 1168                    | 1441 | 2992,2                         | 43118                          | 244423                                                 |
| 1050                    | 1323 | 2315,7                         | 30637                          | 173672                                                 | 1170                    | 1443 | 3004,6                         | 43356                          | 245772                                                 |
| 1052                    | 1325 | 2326,2                         | 30822                          | 174721                                                 | 1172                    | 1445 | 3017,2                         | 43599                          | 247150                                                 |
| 1054                    | 1327 | 2336,7                         | 31008                          | 175775                                                 | 1174                    | 1447 | 3029,7                         | 43840                          | 248516                                                 |
| 1056                    | 1329 | 2347,3                         | 31196                          | 176841                                                 | 1176                    | 1449 | 3042,3                         | 44083                          | 249893                                                 |
| 1058                    | 1331 | 2358,0                         | 31385                          | 177912                                                 | 1178                    | 1451 | 3054,9                         | 44327                          | 251276                                                 |
| 1060                    | 1333 | 2368,6                         | 31573                          | 178978                                                 | 1180                    | 1453 | 3067,6                         | 44572                          | 252665                                                 |
| 1062                    | 1335 | 2379,2                         | 31762                          | 180049                                                 | 1182                    | 1455 | 3080,3                         | 44818                          | 254060                                                 |
| 1064                    | 1337 | 2390,0                         | 31954                          | 181138                                                 | 1184                    | 1457 | 3092,9                         | 45064                          | 255454                                                 |
| 1066                    | 1339 | 2400,7                         | 32145                          | 182220                                                 | 1186                    | 1459 | 3105,7                         | 45312                          | 256860                                                 |
| 1068                    | 1341 | 2411,4                         | 32337                          | 183309                                                 | 1188                    | 1461 | 3118,5                         | 45561                          | 258272                                                 |
| 1070                    | 1343 | 2422,2                         | 32530                          | 184403                                                 | 1190                    | 1463 | 3131,4                         | 45812                          | 259694                                                 |
| 1072                    | 1345 | 2433,1                         | 32725                          | 185508                                                 | 1192                    | 1465 | 3144,2                         | 46063                          | 261117                                                 |
| 1074                    | 1347 | 2444,0                         | 32920                          | 186614                                                 | 1194                    | 1467 | 3157,1                         | 46315                          | 262546                                                 |
| 1076                    | 1349 | 2454,9                         | 33117                          | 187730                                                 | 1196                    | 1469 | 3170,0                         | 46567                          | 263974                                                 |
| 1078                    | 1351 | 2465,8                         | 33313                          | 188841                                                 | 1198                    | 1471 | 3183,0                         | 46822                          | 265420                                                 |
| 1080                    | 1353 | 2476,8                         | 33511                          | 189964                                                 | 1200                    | 1473 | 3196,0                         | 47077                          | 266865                                                 |

| Темпе-<br>ратура,<br>°C | T    | $\left(\frac{T}{100}\right)^3$ | $\left(\frac{T}{100}\right)^4$ | $5,67 \times$<br>$\times \left(\frac{T}{100}\right)^4$ | Темпе-<br>ратура,<br>°C | T    | $\left(\frac{T}{100}\right)^3$ | $\left(\frac{T}{100}\right)^4$ | $5,67 \times$<br>$\times \left(\frac{T}{100}\right)^4$ |
|-------------------------|------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------|------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 1202                    | 1475 | 3209,1                         | 47334                          | 268322                                                 | 1322                    | 1595 | 4057,7                         | 64720                          | 366878                                                 |
| 1204                    | 1477 | 3222,1                         | 47590                          | 269773                                                 | 1324                    | 1597 | 4073,0                         | 65046                          | 368726                                                 |
| 1206                    | 1479 | 3235,2                         | 47849                          | 271242                                                 | 1326                    | 1599 | 4088,3                         | 65372                          | 370572                                                 |
| 1208                    | 1481 | 3248,4                         | 48109                          | 272715                                                 | 1328                    | 1601 | 4103,7                         | 65700                          | 372434                                                 |
| 1210                    | 1483 | 3261,5                         | 48368                          | 274184                                                 | 1330                    | 1603 | 4119,1                         | 66029                          | 374298                                                 |
| 1212                    | 1485 | 3274,8                         | 48631                          | 275675                                                 | 1332                    | 1605 | 4134,5                         | 66359                          | 376169                                                 |
| 1214                    | 1487 | 3288,0                         | 48893                          | 277160                                                 | 1334                    | 1607 | 4149,9                         | 66689                          | 378040                                                 |
| 1216                    | 1489 | 3301,3                         | 49156                          | 278651                                                 | 1336                    | 1609 | 4165,4                         | 67021                          | 379922                                                 |
| 1218                    | 1491 | 3314,6                         | 49421                          | 280153                                                 | 1338                    | 1611 | 4181,0                         | 67356                          | 381821                                                 |
| 1220                    | 1493 | 3327,9                         | 49686                          | 281655                                                 | 1340                    | 1613 | 4196,7                         | 67693                          | 383731                                                 |
| 1222                    | 1495 | 3341,4                         | 49954                          | 283174                                                 | 1342                    | 1615 | 4212,2                         | 68027                          | 385624                                                 |
| 1224                    | 1497 | 3354,8                         | 50221                          | 284688                                                 | 1344                    | 1617 | 4228,0                         | 68367                          | 387552                                                 |
| 1226                    | 1499 | 3368,3                         | 50491                          | 286218                                                 | 1346                    | 1619 | 4243,7                         | 68705                          | 389468                                                 |
| 1228                    | 1501 | 3381,8                         | 50761                          | 287749                                                 | 1348                    | 1621 | 4259,3                         | 69043                          | 391384                                                 |
| 1230                    | 1503 | 3395,3                         | 51031                          | 289279                                                 | 1350                    | 1623 | 4275,1                         | 69385                          | 393323                                                 |
| 1232                    | 1505 | 3408,8                         | 51302                          | 290816                                                 | 1352                    | 1625 | 4291,0                         | 69729                          | 395273                                                 |
| 1234                    | 1507 | 3422,4                         | 51575                          | 292363                                                 | 1354                    | 1627 | 4306,9                         | 70073                          | 397223                                                 |
| 1236                    | 1509 | 3436,0                         | 51849                          | 293916                                                 | 1356                    | 1629 | 4322,8                         | 70418                          | 399179                                                 |
| 1238                    | 1511 | 3449,8                         | 52126                          | 295487                                                 | 1358                    | 1631 | 4338,7                         | 70764                          | 401140                                                 |
| 1240                    | 1513 | 3463,6                         | 52404                          | 297063                                                 | 1360                    | 1633 | 4354,7                         | 71112                          | 403113                                                 |
| 1242                    | 1515 | 3477,2                         | 52680                          | 298627                                                 | 1362                    | 1635 | 4370,7                         | 71461                          | 405091                                                 |
| 1244                    | 1517 | 3491,1                         | 52960                          | 300214                                                 | 1364                    | 1637 | 4386,8                         | 71812                          | 407081                                                 |
| 1246                    | 1519 | 3504,9                         | 53239                          | 301796                                                 | 1366                    | 1639 | 4402,9                         | 72163                          | 409070                                                 |
| 1248                    | 1521 | 3518,7                         | 53519                          | 303383                                                 | 1368                    | 1641 | 4419,0                         | 72516                          | 411071                                                 |
| 1250                    | 1523 | 3532,6                         | 53801                          | 304982                                                 | 1370                    | 1643 | 4435,2                         | 72870                          | 413078                                                 |
| 1252                    | 1525 | 3546,6                         | 54086                          | 306597                                                 | 1372                    | 1645 | 4451,4                         | 73226                          | 415096                                                 |
| 1254                    | 1527 | 3560,6                         | 54370                          | 308207                                                 | 1374                    | 1647 | 4467,7                         | 73582                          | 417114                                                 |
| 1256                    | 1529 | 3574,6                         | 54656                          | 309828                                                 | 1376                    | 1649 | 4483,9                         | 73939                          | 419180                                                 |
| 1258                    | 1531 | 3588,6                         | 54941                          | 311444                                                 | 1378                    | 1651 | 4500,3                         | 74300                          | 421184                                                 |
| 1260                    | 1533 | 3602,6                         | 55228                          | 313071                                                 | 1380                    | 1653 | 4516,7                         | 74661                          | 423231                                                 |
| 1262                    | 1535 | 3616,8                         | 55518                          | 314715                                                 | 1382                    | 1655 | 4533,1                         | 75023                          | 425282                                                 |
| 1264                    | 1537 | 3630,9                         | 55807                          | 316353                                                 | 1384                    | 1657 | 4549,5                         | 75385                          | 427335                                                 |
| 1266                    | 1539 | 3645,1                         | 56098                          | 318003                                                 | 1386                    | 1659 | 4566,0                         | 75750                          | 429404                                                 |
| 1268                    | 1541 | 3659,4                         | 56391                          | 319664                                                 | 1388                    | 1661 | 4582,6                         | 76117                          | 431484                                                 |
| 1270                    | 1543 | 3673,6                         | 56684                          | 321325                                                 | 1390                    | 1663 | 4599,1                         | 76483                          | 433559                                                 |
| 1272                    | 1545 | 3687,9                         | 56978                          | 322991                                                 | 1392                    | 1665 | 4615,7                         | 76851                          | 435645                                                 |
| 1274                    | 1547 | 3702,3                         | 57275                          | 324675                                                 | 1394                    | 1667 | 4632,4                         | 77222                          | 437748                                                 |
| 1276                    | 1549 | 3716,7                         | 57572                          | 326358                                                 | 1396                    | 1669 | 4649,1                         | 77593                          | 439851                                                 |
| 1278                    | 1551 | 3731,1                         | 57869                          | 328042                                                 | 1398                    | 1671 | 4665,8                         | 77966                          | 441966                                                 |
| 1280                    | 1553 | 3745,5                         | 58168                          | 329737                                                 | 1400                    | 1673 | 4682,6                         | 78340                          | 444086                                                 |
| 1282                    | 1555 | 3760,0                         | 58468                          | 331437                                                 | 1405                    | 1678 | 4724,7                         | 79280                          | 449415                                                 |
| 1284                    | 1557 | 3774,6                         | 58771                          | 333155                                                 | 1410                    | 1683 | 4767,1                         | 80230                          | 454800                                                 |
| 1286                    | 1559 | 3789,1                         | 59072                          | 334861                                                 | 1415                    | 1688 | 4809,7                         | 81188                          | 460230                                                 |
| 1288                    | 1561 | 3803,7                         | 59376                          | 336585                                                 | 1420                    | 1693 | 4852,6                         | 82155                          | 465712                                                 |
| 1290                    | 1563 | 3818,4                         | 59682                          | 338319                                                 | 1425                    | 1698 | 4895,7                         | 83129                          | 471233                                                 |
| 1292                    | 1565 | 3833,0                         | 59986                          | 340043                                                 | 1430                    | 1703 | 4939,1                         | 84113                          | 476811                                                 |
| 1294                    | 1567 | 3847,8                         | 60295                          | 341794                                                 | 1435                    | 1708 | 4982,7                         | 85105                          | 482435                                                 |
| 1296                    | 1569 | 3862,5                         | 60603                          | 343540                                                 | 1440                    | 1713 | 5026,6                         | 86106                          | 488109                                                 |
| 1298                    | 1571 | 3877,3                         | 60912                          | 345292                                                 | 1445                    | 1718 | 5070,7                         | 87115                          | 493829                                                 |
| 1300                    | 1573 | 3892,1                         | 61221                          | 347043                                                 | 1450                    | 1723 | 5115,1                         | 88133                          | 499600                                                 |
| 1302                    | 1575 | 3906,9                         | 61535                          | 348823                                                 | 1455                    | 1728 | 5159,8                         | 89161                          | 505427                                                 |
| 1304                    | 1577 | 3921,9                         | 61848                          | 350598                                                 | 1460                    | 1733 | 5204,7                         | 90197                          | 511300                                                 |
| 1306                    | 1579 | 3939,3                         | 62201                          | 352599                                                 | 1465                    | 1738 | 5249,9                         | 91243                          | 517229                                                 |
| 1308                    | 1581 | 3951,8                         | 62478                          | 354169                                                 | 1470                    | 1743 | 5295,3                         | 92297                          | 523204                                                 |
| 1310                    | 1583 | 3966,8                         | 62794                          | 355960                                                 | 1475                    | 1748 | 5341,0                         | 93361                          | 529236                                                 |
| 1312                    | 1585 | 3981,9                         | 63113                          | 357769                                                 | 1480                    | 1753 | 5387,0                         | 94434                          | 535318                                                 |
| 1314                    | 1587 | 3997,0                         | 63432                          | 359577                                                 | 1485                    | 1758 | 5433,2                         | 95516                          | 541452                                                 |
| 1316                    | 1589 | 4012,1                         | 63752                          | 361391                                                 | 1490                    | 1763 | 5479,7                         | 96607                          | 547636                                                 |
| 1318                    | 1591 | 4027,3                         | 64074                          | 363216                                                 | 1495                    | 1768 | 5526,5                         | 97709                          | 553883                                                 |
| 1320                    | 1593 | 4042,5                         | 64357                          | 364821                                                 | 1500                    | 1773 | 5573,5                         | 98818                          | 560170                                                 |

| Темпе-<br>ратура,<br>°C | $T$  | $\left(\frac{T}{100}\right)^*$ | $\left(\frac{T}{100}\right)^*$ | $5,67 \times$<br>$\times \left(\frac{T}{100}\right)^*$ | Темпе-<br>ратура,<br>°C | $T$  | $\left(\frac{T}{100}\right)^*$ | $\left(\frac{T}{100}\right)^*$ | $5,67 \times$<br>$\times \left(\frac{T}{100}\right)^*$ |
|-------------------------|------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------|------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 1505                    | 1778 | 5620,8                         | 99938                          | 566519                                                 | 1755                    | 2028 | 8340,7                         | 169149                         | 958855                                                 |
| 1510                    | 1783 | 5668,3                         | 101066                         | 572912                                                 | 1760                    | 2033 | 8402,6                         | 170825                         | 968356                                                 |
| 1515                    | 1788 | 5716,1                         | 102204                         | 579364                                                 | 1765                    | 2038 | 8464,7                         | 172510                         | 977907                                                 |
| 1520                    | 1793 | 5764,1                         | 103350                         | 585860                                                 | 1770                    | 2043 | 8527,2                         | 174211                         | 976212                                                 |
| 1525                    | 1798 | 5812,6                         | 104511                         | 592442                                                 | 1775                    | 2048 | 8589,9                         | 175921                         | 997243                                                 |
| 1530                    | 1803 | 5861,2                         | 105677                         | 599051                                                 | 1780                    | 2053 | 8653,0                         | 177646                         | 1007022                                                |
| 1535                    | 1808 | 5910,2                         | 106856                         | 605735                                                 | 1785                    | 2058 | 8716,4                         | 179384                         | 1016874                                                |
| 1540                    | 1813 | 5959,1                         | 108038                         | 612435                                                 | 1790                    | 2063 | 8780,1                         | 181133                         | 1026789                                                |
| 1545                    | 1818 | 6008,7                         | 109238                         | 619237                                                 | 1795                    | 2068 | 8844,1                         | 182896                         | 1036783                                                |
| 1550                    | 1823 | 6058,4                         | 110444                         | 626074                                                 | 1800                    | 2073 | 8908,4                         | 184671                         | 1046844                                                |
| 1555                    | 1828 | 6108,4                         | 111662                         | 632973                                                 | 1805                    | 2078 | 8973,0                         | 186459                         | 1056980                                                |
| 1560                    | 1833 | 6158,7                         | 112889                         | 639934                                                 | 1810                    | 2083 | 9037,9                         | 188256                         | 1067167                                                |
| 1565                    | 1838 | 6209,2                         | 114125                         | 646940                                                 | 1815                    | 2088 | 9103,1                         | 190073                         | 1077467                                                |
| 1570                    | 1843 | 6260,0                         | 115372                         | 654009                                                 | 1820                    | 2093 | 9168,7                         | 191901                         | 1087829                                                |
| 1575                    | 1848 | 6311,1                         | 116629                         | 661135                                                 | 1825                    | 2098 | 9234,6                         | 193742                         | 1098265                                                |
| 1580                    | 1853 | 6362,5                         | 117897                         | 668323                                                 | 1830                    | 2103 | 9300,7                         | 195595                         | 1108769                                                |
| 1585                    | 1858 | 6414,0                         | 119172                         | 675550                                                 | 1835                    | 2108 | 9367,2                         | 197461                         | 1119347                                                |
| 1590                    | 1863 | 6466,1                         | 120463                         | 682869                                                 | 1840                    | 2113 | 9434,1                         | 199342                         | 1130009                                                |
| 1595                    | 1868 | 6518,2                         | 121759                         | 690215                                                 | 1845                    | 2118 | 9501,2                         | 201235                         | 1140741                                                |
| 1600                    | 1873 | 6570,7                         | 123069                         | 697641                                                 | 1850                    | 2123 | 9568,6                         | 203142                         | 1151551                                                |
| 1605                    | 1878 | 6620,9                         | 124341                         | 704852                                                 | 1855                    | 2128 | 9636,4                         | 205063                         | 1162441                                                |
| 1610                    | 1883 | 6676,5                         | 125718                         | 712658                                                 | 1860                    | 2133 | 9704,5                         | 206997                         | 1173404                                                |
| 1615                    | 1888 | 6725,9                         | 126985                         | 719840                                                 | 1865                    | 2138 | 9772,9                         | 208945                         | 1184446                                                |
| 1620                    | 1893 | 6783,5                         | 128412                         | 727929                                                 | 1870                    | 2143 | 9841,6                         | 210905                         | 1195557                                                |
| 1625                    | 1898 | 6837,4                         | 129774                         | 735678                                                 | 1875                    | 2148 | 9910,7                         | 212882                         | 1206764                                                |
| 1630                    | 1903 | 6891,5                         | 131145                         | 743422                                                 | 1880                    | 2153 | 9980,0                         | 214869                         | 1218028                                                |
| 1635                    | 1908 | 6946,1                         | 132532                         | 751318                                                 | 1885                    | 2158 | 10050                          | 216879                         | 1229421                                                |
| 1640                    | 1913 | 7000,8                         | 133925                         | 759181                                                 | 1890                    | 2163 | 10120                          | 218896                         | 1240856                                                |
| 1645                    | 1918 | 7055,7                         | 135328                         | 767134                                                 | 1895                    | 2168 | 10190                          | 220919                         | 1252324                                                |
| 1650                    | 1923 | 7111,1                         | 136746                         | 775172                                                 | 1900                    | 2173 | 10261                          | 222971                         | 1263956                                                |
| 1655                    | 1928 | 7166,7                         | 138174                         | 783267                                                 | 1905                    | 2178 | 10332                          | 225031                         | 1275633                                                |
| 1660                    | 1933 | 7222,6                         | 139613                         | 791424                                                 | 1910                    | 2183 | 10403                          | 227097                         | 1287345                                                |
| 1665                    | 1938 | 7278,8                         | 141063                         | 799644                                                 | 1915                    | 2188 | 10475                          | 229193                         | 1299226                                                |
| 1670                    | 1943 | 7335,3                         | 142525                         | 807931                                                 | 1920                    | 2193 | 10547                          | 231296                         | 1311147                                                |
| 1675                    | 1948 | 7392,1                         | 143998                         | 816281                                                 | 1925                    | 2198 | 10619                          | 233406                         | 1323108                                                |
| 1680                    | 1953 | 7449,2                         | 145483                         | 824699                                                 | 1930                    | 2203 | 10692                          | 235545                         | 1335234                                                |
| 1685                    | 1958 | 7506,5                         | 146977                         | 833168                                                 | 1935                    | 2208 | 10765                          | 237691                         | 1347400                                                |
| 1690                    | 1963 | 7564,2                         | 148485                         | 841717                                                 | 1940                    | 2213 | 10838                          | 239845                         | 1359609                                                |
| 1695                    | 1968 | 7622,1                         | 150003                         | 850322                                                 | 1945                    | 2218 | 10911                          | 242006                         | 1371859                                                |
| 1700                    | 1973 | 7680,4                         | 151534                         | 859001                                                 | 1950                    | 2223 | 10985                          | 244197                         | 1384280                                                |
| 1705                    | 1978 | 7738,9                         | 153075                         | 867736                                                 | 1955                    | 2228 | 11060                          | 246417                         | 1396864                                                |
| 1710                    | 1983 | 7797,7                         | 154628                         | 876540                                                 | 1960                    | 2233 | 11134                          | 248622                         | 1409364                                                |
| 1715                    | 1988 | 7856,9                         | 156195                         | 885423                                                 | 1965                    | 2238 | 11209                          | 250857                         | 1422033                                                |
| 1720                    | 1993 | 7916,3                         | 157772                         | 894362                                                 | 1970                    | 2243 | 11285                          | 253123                         | 1434878                                                |
| 1725                    | 1998 | 7976,0                         | 159360                         | 903364                                                 | 1975                    | 2248 | 11360                          | 255373                         | 1447633                                                |
| 1730                    | 2003 | 8036,0                         | 160961                         | 912440                                                 | 1980                    | 2253 | 11436                          | 257653                         | 1460558                                                |
| 1735                    | 2008 | 8096,4                         | 162576                         | 921595                                                 | 1985                    | 2258 | 11513                          | 259964                         | 1473658                                                |
| 1740                    | 2013 | 8157,0                         | 164200                         | 930801                                                 | 1990                    | 2263 | 11589                          | 262259                         | 1486668                                                |
| 1745                    | 2018 | 8217,9                         | 165837                         | 940080                                                 | 1995                    | 2268 | 11666                          | 264585                         | 1499853                                                |
| 1750                    | 2023 | 8279,2                         | 167488                         | 949439                                                 | 2000                    | 2273 | 11812                          | 268487                         | 1521972                                                |

Энергия излучения серого тела

5,6703

$$E = \varepsilon E_0 = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100}\right)^4 = \varepsilon \cdot 4,96 \left(\frac{T}{100}\right)^4 = C \left(\frac{T}{100}\right)^4.$$

Здесь  $C$  — коэффициент излучения серого тела.

**Закон Вина** устанавливает связь между температурой и длиной волны  $\lambda_{\max}$  с максимальной интенсивностью излучения и гласит, что с повы-

шением температуры максимум излучения смещается в сторону более коротких волн,  $\lambda_{\max} T = 2,88$  мм·К. Произведение длины волны, соответствующей максимальной интенсивности излучения, на абсолютную температуру является постоянной величиной.

**Закон косинусов (Ламберта).** Согласно этому закону, количество энергии, излучаемое элементом поверхности  $dF_1$  в направлении элемента  $dF_2$  (с углом  $\varphi$  между нормальными к поверхностям), пропорционально количеству энергии, излучаемой по нормали  $dE_n$ , умноженному на величину пространственного угла  $d\omega$  и  $\cos \varphi$ , т. е.

$$d^2 E_{\varphi} = d E_n d \omega \cos \varphi \text{ Вт.}$$

Следствие, вытекающее из этого закона: лучеиспускательная способность в направлении нормали в  $\pi$  раз меньше полной лучеиспускательной способности тела:

$$E_n = \frac{E}{\pi} = \frac{1}{\pi} C \left( \frac{T}{100} \right)^4 = \frac{\varepsilon}{\pi} C_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4;$$

$$d^2 E_{\varphi} = \frac{\varepsilon}{\pi} C_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4 d \omega d F_1 \cos \varphi.$$

**Закон квадратов расстояний** гласит, что плотность лучистого потока изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от источника излучения:

$$E_r = E_1 / r^2,$$

где  $E_1$  — плотность лучистого потока на расстоянии 1 м от излучателя;  
 $E_r$  — то же, на расстоянии  $r$ , м.

### Свойства лучистых потоков

При расчете теплообмена между телами применяют метод поточной алгебры, который использует приведенные ниже понятия и свойства лучистых потоков.

Угловой коэффициент, или коэффициент облученности,  $\varphi_{12}$  показывает, какая часть полусферического лучистого потока, излучаемого одним телом  $Q_1$ , попадает на другое тело  $Q_{12}$ , находящееся с ним в процессе теплообмена:

$$\varphi_{12} = \frac{Q_{12}}{Q_1} = \frac{F_{12}}{F_1} = \frac{1}{F_1} \int_{F_1} \int_{F_2} \frac{\cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2}{\pi r^2} d F_1 \cdot d F_2;$$

$$\varphi_{21} = \frac{Q_{21}}{Q_2} = \frac{F_{21}}{F_2} = \frac{1}{F_2} \int_{F_1} \int_{F_2} \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{\pi r^2} d F_1 \cdot d F_2,$$

где  $F_1$  и  $F_2$  — поверхности тел, находящихся в состоянии теплообмена, а  $F_{12}$  — расчетная поверхность при определении количества тепла, переданного с первого тела на второе.

Свойство совместимости определяет условие равенства теплопоток, исходящих от одного и того же тела и полностью проектирующихся на стоящие друг за другом тела:

$$Q_{12} = Q_{13}; \quad Q_{12} = \varphi_{12} \cdot F_1 \cdot E_1 = E_1 F_{12};$$

$$Q_{13} = \varphi_{13} \cdot F_1 \cdot E_1 = E_1 F_{13}; \quad \varphi_{12} = \varphi_{13}; \quad F_{12} = F_{13}.$$

Свойство распределительности заключается в том, что лучистый поток от тела 1 на тело 2 складывается из потоков между отдельными частями тел 1 и 2:

$$Q_{12} = Q_{1a, 2a} + Q_{1a, 2b} + Q_{1b, 2a} + Q_{1b, 2b};$$

$$F_{12} = F_{1a, 2a} + F_{1a, 2b} + F_{1b, 2a} + F_{1b, 2b}.$$

Свойство затеняемости — если на пути всех лучей от тела 1 на тело 2 помещается непрозрачное тело, то лучистый поток равен нулю:

$$Q_{12} = 0; \quad F_{12} = 0; \quad \varphi_{12} = 0.$$

Отсюда следствие: для плоских и выпуклых тел отсутствует самооблучение:

$$Q_{11} = 0; \quad \varphi_{11} = 0; \quad F_{11} = 0.$$

Свойство замыкаемости состоит в том, что для замкнутой системы тел и сред лучистый поток, посылаемый одним из тел на все остальные, равен полусферическому излучению этого тела:

$$\sum_{i=1}^n Q_{k,i} = Q_k = F_k E_k; \quad \sum_{i=1}^n \varphi_{k,i} = 1; \quad \sum_{i=1}^n F_{k,i} = F_k$$

для  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ .

Если тело  $k$  имеет вогнутости, то в число тел  $n$  должно входить и тело  $k$ .

Свойство взаимности. Если имеются абсолютно черные тела 1 и 2, находящиеся в состоянии теплообмена, то при равенстве температур будет иметь место равенство лучистых потоков независимо от формы и расположения этих тел среди других:

$$Q_{12} = Q_{21}; \quad \varphi_{12} F_1 = \varphi_{21} F_2; \quad F_{12} = F_{21}.$$

**Теплообмен посредством излучения между двумя абсолютно черными телами, произвольно расположенными в пространстве**

Количество тепла между двумя абсолютно черными телами 1 и 2 определяют по формуле

$$Q_{012} = C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_{12} \tau \text{ кДж},$$

где  $F_{12}$  — расчетная поверхность теплообмена, определяемая из выражения

$$F_{12} = \int_{F_1} \int_{F_2} \frac{\cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2}{\pi r^2} dF_1 dF_2 \text{ м}^2,$$

$$F_{12} = \varphi_{12} \cdot F_1; \quad F_{21} = \varphi_{21} \cdot F_2;$$

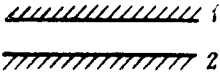
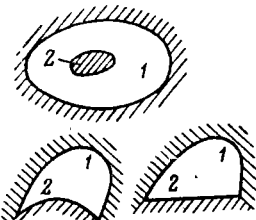
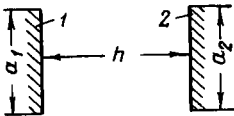
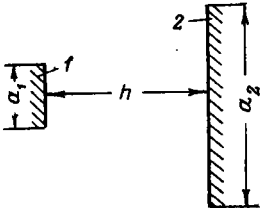
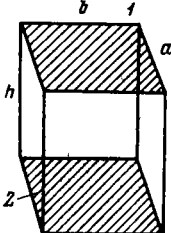
$\varphi_1$  и  $\varphi_2$  — углы между нормалью в центре элементарных площадок и направлением лучистого потока;

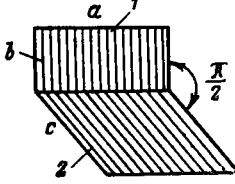
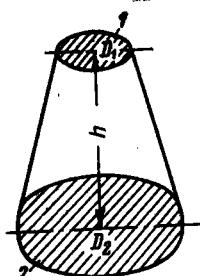
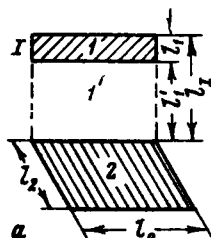
$F_1$  и  $F_2$  — поверхности тел 1 и 2, участвующих в теплообмене;

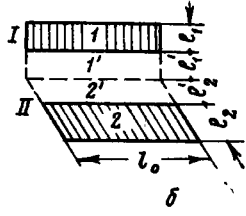
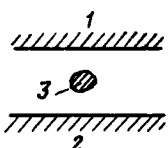
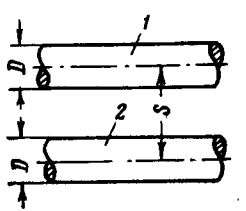
$r$  — расстояние между элементарными площадками  $dF_1$  и  $dF_2$ .

Угловые коэффициенты и расчетные поверхности, определенные методами «соотношения проекций», «натянутых нитей» и др., для различных случаев теплообмена между двумя произвольно расположенными в пространстве абсолютно черными телами представлены в табл. XII-6.

## Формулы для расчета угловых коэффициентов и расчетных поверхностей

| Взаимное расположение и форма поверхностей                                                                                                                                  | Схема                                                                               | Угловые коэффициенты и расчетные поверхности                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Две параллельные плоскости, размеры которых значительно больше расстояния между ними                                                                                     |    | $\Phi_{12} = \Phi_{21} = 1$ $F_{12} = F_1 = F_2$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 2а*. Одно тело, не имеющее вогнутостей, находится внутри другого тела.<br>2б*. Две поверхности образуют замкнутую систему, причем одна из поверхностей не имеет вогнутостей |    | $\Phi_{21} = 1; \quad \Phi_{12} = \frac{F_2}{F_1}$ $F_{12} = F_2$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 3. Две бесконечные параллельные полосы одинаковой ширины                                                                                                                    |    | $\Phi_{12} = \Phi_{21} = \sqrt{1 + \left(\frac{h}{a}\right)^2} - \frac{h}{a};$ $F_{12} = \sqrt{a^2 + h^2} - h.$ <p>Поверхность <math>F_{12}</math> отнесена к 1 м длины полос <math>a = a_1 = a_2</math></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 4. Две бесконечные параллельные полосы разной ширины                                                                                                                        |   | $\Phi_{12} = \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{a_2}{a_1} + 1\right)^2 + \left(\frac{h}{a_1}\right)^2} - \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{a_2}{a_1} - 1\right)^2 + \left(\frac{h}{a_1}\right)^2};$ $\Phi_{21} = \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{a_1}{a_2} + 1\right)^2 + \left(\frac{h}{a_2}\right)^2} - \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{a_1}{a_2} - 1\right)^2 + \left(\frac{h}{a_2}\right)^2};$ $F_{12} = \sqrt{\frac{1}{4} (a_2 + a_1)^2 + h^2} - \sqrt{\frac{1}{4} (a_2 - a_1)^2 + h^2}.$ <p>Поверхность <math>F_{12}</math> отнесена к 1 м длины полос</p> |
| 5. Два одинаковых прямоугольника, расположенных в параллельных плоскостях друг против друга (см. рис. 147)                                                                  |  | $\Phi_{12} = \frac{2}{\pi} \left[ \frac{1}{a} \sqrt{a^2 + h^2} \arctg \times \right.$ $\times \frac{b}{\sqrt{a^2 + h^2}} + \frac{1}{b} \sqrt{b^2 + h^2} \times$ $\times \arctg \frac{a}{\sqrt{b^2 + h^2}} - \frac{h}{a} \arctg \times$ $\times \left(\frac{b}{h}\right) - \frac{h}{b} \arctg \left(\frac{a}{h}\right) +$ $\left. + \frac{h^2}{2ab} \ln \frac{(a^2 + h^2)(b^2 + h^2)}{(a^2 + b^2 + h^2)h^2} \right];$ $F_{12} = a \cdot b \cdot \Phi_{12}$                                                                                           |

| Взаимное расположение и форма поверхностей                                                         | Схема                                                                               | Угловые коэффициенты и расчетные поверхности                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                    |                                                                                     | <p>Для квадратов (<math>a = b</math>)</p> $\Phi_{12} = \frac{2}{\pi} \left[ \frac{2}{a} \sqrt{a^2 + h^2} \operatorname{arctg} \times \right. \\ \times \frac{a}{\sqrt{a^2 + h^2}} - 2 \frac{h}{a} \operatorname{arctg} \frac{a}{h} + \\ \left. + \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^2 \ln \frac{(a^2 + h^2)^2}{h^2 (2a^2 + h^2)} \right];$ $F_{12} = a^2 \Phi_{12}.$ <p>Расчетные значения см. рис. 147</p>                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <p>6. Два взаимно перпендикулярных прямоугольника, имеющих общую грань (см. рис. 148)</p>          |    | $\Phi_{12} = \frac{1}{\pi} \left[ \operatorname{arctg} \frac{a}{b} + \frac{c}{b} \operatorname{arctg} \frac{a}{c} - \right. \\ - \sqrt{\left( \frac{c}{a} \right)^2 - 1} \operatorname{arctg} \frac{a}{\sqrt{b^2 + c^2}} + \\ + \frac{c^2}{4ab} \ln \frac{(a^2 + b^2 + c^2) c^2}{(a^2 + c^2) (b^2 + c^2)} + \\ + \frac{b}{4a} \ln \frac{(a^2 + b^2 + c^2) b^2}{(a^2 + c^2) (b^2 + c^2)} - \\ \left. - \frac{a}{4b} \ln \frac{(a^2 + b^2 + c^2) a^2}{(a^2 + b^2) (a^2 + c^2)} \right];$ $F_{12} = ab \Phi_{12}.$ <p>Расчетные значения см. рис. 148</p>                                                                                                              |
| <p>7. Два параллельных круга с центрами на общей нормали к их плоскостям (см. рис. 147)</p>        |   | <p>а.</p> $\Phi_{12} = \left[ \sqrt{\left( \frac{D_2}{2D_1} + \frac{1}{2} \right)^2 + \left( \frac{h}{D_1} \right)^2} - \right. \\ \left. - \sqrt{\left( \frac{D_2}{2D_1} - \frac{1}{2} \right)^2 + \left( \frac{h}{D_1} \right)^2} \right];$ $F_{12} = \frac{\pi}{4} \left[ \sqrt{\left( \frac{D_2 + D_1}{2} \right)^2 + h^2} - \right. \\ \left. - \sqrt{\left( \frac{D_2 - D_1}{2} \right)^2 + h^2} \right];$ <p>б. Для кругов одинакового диаметра <math>D_1 = D_2 = D</math></p> $\Phi_{12} = \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{h}{D} \right)^2} - \frac{h}{D} \right];$ $F_{12} = \frac{\pi}{4} (\sqrt{D^2 + h^2} - h)^2.$ <p>Расчетные значения см. рис. 147</p> |
| <p>8. Два прямоугольника, расположенных в перпендикулярных плоскостях и не имеющих общей грани</p> |  | $F_{12} = F_{12} - F_{1'2}; \quad l = l_1 + l'_1;$ $\Phi_{12} = \frac{F_{12}}{l_1 l_2} = \Phi_{12} \frac{l_1 + l'_1}{l_1} - \\ - \Phi_{1'2} \frac{l'_1}{l_1};$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |

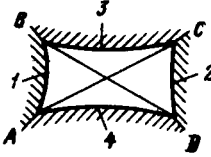
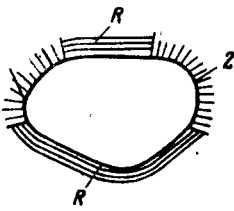
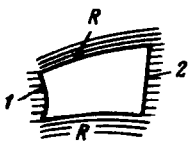
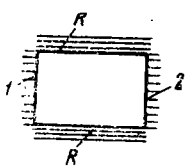
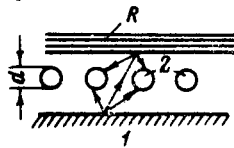
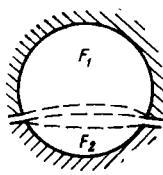
| Взаимное расположение и форма поверхностей                                                                                 | Схема                                                                               | Угловые коэффициенты и расчетные поверхности                                                                                                                                                                                                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                            |    | $\varphi_{12} = (\varphi_{1,11} - \varphi_{12'}) \frac{l_1 + l_1'}{l_1} - (\varphi_{1'11} - \varphi_{1'2'}) \frac{l_1'}{l_1};$ $F_{12} = \varphi_{12} l_1 l_0 = F_{1,11} - F_{12'} + F_{1'2'} - F_{1'11};$ $I = 1 + 1'; II = 2 + 2'$                    |
| 9*. Две поверхности, образующие замкнутую полость. Меньшая поверхность имеет вогнутость                                    |    | $\varphi_{12} = \frac{F_{12}}{F_1};$ $F_{12} = \frac{1}{2} (F_{1,11} - F_{12'} - F_{1'2});$ $I = 1 + 1'; II = 2 + 2'$                                                                                                                                   |
| 10. Выпуклое тело, находящееся между двумя параллельными стенками. Размеры тела малы по сравнению с размерами поверхностей |  | $\varphi_{12} = \varphi_{21} = 1;$ $\varphi_{23} = \varphi_{13} = 0;$ $\varphi_{31} = \varphi_{32} = \frac{1}{2};$ $F_{12} = F_1 - F_3;$ $F_{13} = F_{31} = F_{23} = F_{32} = \frac{1}{2} F_3$                                                          |
| 11. Два параллельных цилиндра одинакового диаметра                                                                         |  | $\varphi_{12} = \frac{1}{\pi} \left[ \arcsin \frac{D}{s} + \sqrt{\left(\frac{s}{D}\right)^2 - 1} - \frac{s}{D} \right];$ $F_{12} = \sqrt{s^2 - D^2} + D \arcsin \frac{D}{s} - s.$ <p>Поверхность <math>F_{12}</math> отнесена к 1 м длины цилиндров</p> |

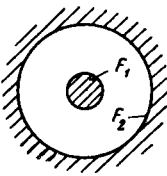
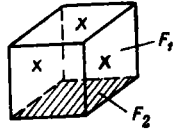
| Взаимное расположение и форма поверхностей                                                                                                                                      | Схема | Угловые коэффициенты и расчетные поверхности                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 12. Элементарная площадка $dF$ и произвольный круг $F$ , плоскость которого параллельна $dF$                                                                                    |       | $\varphi_{dFF} = \frac{1}{2} \times$ $\times \left[ 1 - \frac{h^2 + a^2 - R^2}{V(h^2 + a^2 + R^2)^2 - 4a^2 R^2} \right];$ $F_{dFF} = \varphi_{dFF} dF$                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 13. Элементарная площадка $dF$ и произвольный круг $F$ , плоскость которого перпендикулярна к $dF$                                                                              |       | $\varphi_{dFF} = \frac{h}{2a} \times$ $\times \left[ \frac{h^2 + a^2 + R^2}{V(h^2 + a^2 + R^2)^2 - 4a^2 R^2} - 1 \right];$ $F_{dFF} = \varphi_{dFF} dF$                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 14. Элементарная площадка $dF$ и прямоугольник $F$ , плоскость которого параллельна $dF$ , причем одна вершина прямоугольника находится по нормали к центру $dF$ (см. рис. 149) |       | $\varphi_{dFF} = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{l_1}{Vh^2 + l_1^2} \times \right.$ $\times \arctg \frac{l_2}{Vh^2 + l_1^2} +$ $\left. + \frac{l_2}{Vh^2 + l_2^2} \arctg \frac{l_1}{Vh^2 + l_2^2} \right];$ $\varphi_{FdF} = \varphi_{dFF} \frac{dF}{F};$ $F_{dFF} = \varphi_{dFF} dF = \varphi_{FdF} F.$ <p>Расчетные значения см. на рис. 149</p>                                                                                         |
| 15. Элементарная площадка $dF$ и произвольный прямоугольник $F$ , плоскость которого параллельна $dF$                                                                           |       | $\varphi_{dFF} = \varphi_{dF I} + \varphi_{dF II} +$ $+ \varphi_{dF III} + \varphi_{dF IV};$ $\varphi_{FdF} = \varphi_{dFF} \frac{dF}{F};$ $F_{dFF} = \varphi_{dFF} dF;$ $\varphi_{dF I}, \varphi_{dF II} \text{ и т. д.}$ <p>— см. предыдущую схему.</p>                                                                                                                                                                               |
| 16. Неограниченная плоскость и ряд труб в параллельной плоскости                                                                                                                |       | $\varphi_{12} = 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{D}{S}\right)^2} +$ $+ \frac{D}{S} \arctg \sqrt{\left(\frac{S}{D}\right)^2 - 1};$ $\varphi_{21} = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{S}{D} - \sqrt{\left(\frac{S}{D}\right)^2 - 1} + \right.$ $\left. + \arctg \sqrt{\left(\frac{S}{D}\right)^2 - 1} \right];$ $F_{12} = F_{21} = \varphi_{12} S = \varphi_{21} D\pi.$ <p>Поверхность <math>F_{12}</math> отнесена к одной трубе и 1 м длины трубы</p> |

| Взаимное расположение и форма поверхностей                                                                         | Схема | Угловые коэффициенты и расчетные поверхности                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |       |       |       |       |       |   |   |    |             |   |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---|---|----|-------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                                                                                    |       | <table><tr><th><math>s/D</math></th><th>1</th><th>1,5</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th><th>5</th><th>10</th></tr><tr><th><math>\Phi_{12}</math></th><td>1</td><td>0,850</td><td>0,658</td><td>0,467</td><td>0,360</td><td>0,294</td><td>0,151</td></tr></table>                                                                                                                                                                                                                                                                                 | $s/D$ | 1     | 1,5   | 2     | 3     | 4 | 5 | 10 | $\Phi_{12}$ | 1 | 0,850 | 0,658 | 0,467 | 0,360 | 0,294 | 0,151 |
| $s/D$                                                                                                              | 1     | 1,5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 2     | 3     | 4     | 5     | 10    |   |   |    |             |   |       |       |       |       |       |       |
| $\Phi_{12}$                                                                                                        | 1     | 0,850                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0,658 | 0,467 | 0,360 | 0,294 | 0,151 |   |   |    |             |   |       |       |       |       |       |       |
| 17. Неограниченная плоскость и два ряда труб в параллельных плоскостях                                             |       | $\Phi_{12} = 1 - (1 - \Phi'_{12})^2;$ $F_{12} = \Phi_{12} s$ <p>(см. указание к предыдущей схеме).<br/><math>\Phi'_{12}</math> — угловой коэффициент для одного ряда труб (см. предыдущий случай)</p> <table><tr><th><math>s/D</math></th><th>1</th><th>1,5</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th><th>5</th><th>10</th></tr><tr><th><math>\Phi_{12}</math></th><td>1</td><td>0,977</td><td>0,883</td><td>0,715</td><td>0,590</td><td>0,500</td><td>0,279</td></tr></table> <p>Для <math>n</math> рядов труб</p> $\Phi_{12} = 1 - (1 - \Phi'_{12})^n$ | $s/D$ | 1     | 1,5   | 2     | 3     | 4 | 5 | 10 | $\Phi_{12}$ | 1 | 0,977 | 0,883 | 0,715 | 0,590 | 0,500 | 0,279 |
| $s/D$                                                                                                              | 1     | 1,5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 2     | 3     | 4     | 5     | 10    |   |   |    |             |   |       |       |       |       |       |       |
| $\Phi_{12}$                                                                                                        | 1     | 0,977                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0,883 | 0,715 | 0,590 | 0,500 | 0,279 |   |   |    |             |   |       |       |       |       |       |       |
| 18. Два произвольных цилиндрических тела, частично затеняемых окружающими телами                                   |       | $\Phi_{12} = \frac{1}{2} \frac{A_1 NB_2 + A_2 MB_1 - A_1 CA_2 - B_1 KEB_2}{\text{периметр } NA_1 B_1 M}$ $\Phi_{21} = \Phi_{12} \frac{\text{периметр } NA_1 B_1 M}{\text{периметр } A_2 PRB_2};$ $F_{12} = F_{21} = \frac{1}{2} \times$ $\times (A_1 NB_2 + A_2 MB_1 - A_1 CA_2 - B_1 KEB_2).$ <p>Поверхности отнесены к 1 м длины тел</p>                                                                                                                                                                                                       |       |       |       |       |       |   |   |    |             |   |       |       |       |       |       |       |
| 19. Два произвольных тела, частично затеняемых расположенным между ними третьим телом (плоскопараллельная система) |       | $\Phi_{12} = \frac{1}{2} \left( \frac{B_1 C + CB_2 + A_1 K + A_2 E - B_1 B_2 - A_1 A_2 - EK}{\text{периметр } A_1 B_1} \right);$ $\Phi_{12} = \Phi_{21} \frac{\text{периметр } A_1 B_1}{\text{периметр } A_2 B_2};$ $F_{12} = \frac{1}{2} (B_1 C + CB_2 + A_1 K + A_2 E - B_1 B_2 - A_1 A_2 - EK).$ <p>Поверхности отнесены к 1 м длины тела</p>                                                                                                                                                                                                 |       |       |       |       |       |   |   |    |             |   |       |       |       |       |       |       |
| 20. Элементарная площадка $dF$ и цилиндрическое тело (плоскопараллельная система)                                  |       | $\Phi_{dFF} = \frac{1}{2} (\sin \gamma_2 - \sin \gamma_1) =$ $= \cos \theta \sin \alpha;$ $\theta = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2}; \quad \alpha = \frac{\gamma_2 + \gamma_1}{2};$ $F_{dFF} = \Phi_{dFF} dF$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |       |       |       |       |       |   |   |    |             |   |       |       |       |       |       |       |

| Взаимное расположение и форма поверхностей                                                                                                                        | Схема | Угловые коэффициенты и расчетные поверхности                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 21. Определение угловых коэффициентов по методу «соотношения проекций» (пространственная система)                                                                 |       | $\varphi_{dF_1 F_2} = \frac{F_2}{\pi R^2};$ $\varphi_{F_1 F_2} = \frac{1}{F_1} \int_{F_1} \varphi_{dF_1 F_2} dF_1;$ $F_{dF_1 F_2} = \varphi_{dF_1 F_2} dF_1$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 22. Определение угловых коэффициентов по методу «соотношения проекций» (плоскопараллельная система)                                                               |       | $\varphi_{dL_1 L_2} = \frac{L_2'}{2R};$ $\varphi_{L_1 L_2} = \frac{1}{L_1} \int_{L_1} \varphi_{dL_1 L_2} dL_1;$ $F_{dF_1 F_2} = \varphi_{dFF} dF$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 23. Определение угловых коэффициентов по методу «натянутых нитей». Две произвольные невогнутые поверхности, имеющие бесконечную протяженность в одном направлении |       | $\varphi_{12} = \frac{AD + BC' C}{2AB} - \frac{BD + AC}{2AB};$ $F_{12} = \frac{1}{2} [AD + BC' C - BD - AC].$ <p>Поверхность <math>F_{12}</math> отнесена к 1 м длины поверхности в направлении бесконечной протяженности; <math>C'</math> — точка пересечения пунктирной прямой, идущей из точки В, с кривой CD</p>                                                                                                                                                                                   |
| 24*. Три невогнутые поверхности, образующие замкнутую систему бесконечной протяженности                                                                           |       | $\varphi_{12} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{F_2}{F_1} - \frac{F_3}{F_2} \right);$ $\varphi_{21} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{F_1}{F_2} - \frac{F_3}{F_1} \right);$ $\varphi_{13} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{F_3}{F_1} - \frac{F_2}{F_1} \right);$ $\varphi_{23} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{F_3}{F_2} - \frac{F_1}{F_2} \right)$ <p>и т. д.</p> $F_{12} = \frac{1}{2} (F_1 + F_2 - F_3);$ $F_{13} = \frac{1}{2} (F_1 + F_3 - F_2);$ $F_{23} = \frac{1}{2} (F_2 + F_3 - F_1) \text{ и т. д.}$ |

Все площади отнесены к 1 м длины поверхностей в направлении бесконечной протяженности

| Взаимное расположение и форма поверхностей                                                                                                          | Схема                                                                               | Угловые коэффициенты и расчетные поверхности                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 25*. Четыре невогнутые поверхности, образующие замкнутую систему бесконечной протяженности                                                          |    | $F_{13} = \frac{1}{2} [F_{AC} + F_{BD} - F_1 - F_4];$ $F_{12} = \frac{1}{2} [F_1 + F_2 - F_{AC}];$ $F_{14} = \frac{1}{2} [F_1 + F_4 - F_{BD}] \text{ и т. д.};$ $\varphi_{kn} = \frac{F_{kn}}{F_k}$ <p>См. указание к предыдущей схеме</p>                                                                                                                                                                                |
| 26*. Замкнутая система, состоящая из поверхностей 1 и 2 через которые подводится и отводится тепло, и отражающей поверхности R, не проводящей тепла |    | $\bar{\varphi}_{12} = \varphi_{12} + \frac{1}{\frac{1}{\varphi_1 R} + \frac{F_1}{F_2} \cdot \frac{1}{\varphi_2 R}}$ $\bar{F}_{12} = F_1 \bar{\varphi}_{12}.$ <p><math>\varphi_{12}</math>, <math>\varphi_1 R</math>, <math>\varphi_2 R</math> подсчитываются для соответствующих случаев по предыдущим формулам, <math>\varphi_{12}</math> учитывает, кроме прямого излучения, и излучение, отраженное поверхностью R</p> |
| 26а. Частный случай: поверхности 1 и 2 не имеют вогнутостей                                                                                         |    | $\bar{\varphi}_{12} = \frac{F_2 - F_1 \varphi_{12}^2}{F_1 + F_2 - 2 F_1 \varphi_{12}};$ $\bar{F}_{12} = F_1 \bar{\varphi}_{12}$                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 26б. Частный случай: поверхности 1 и 2 равны и параллельны (диски, квадраты, прямоугольники и т. п.)                                                |   | $\bar{\varphi}_{12} = \frac{1 + \varphi_{12}}{2};$ $\bar{F}_{12} = F_1 \bar{\varphi}_{12}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 27. Неограниченная плоскость 1 и однорядный или двухрядный пучок труб 2 при наличии отражающей поверхности R, расположенной за пучком               |  | $\bar{\varphi}_{12} = \varphi_{12} (2 - \varphi_{12});$ $\bar{F}_{12} = F_1 \bar{\varphi}_{12} = F_2 \bar{\varphi}_{21}.$ <p>Для однорядного пучка <math>\varphi_{12}</math> вычисляется по формуле (<math>\varphi_{12} = \varphi_{12}</math>) п. 16; для двухрядного — по формуле п. 17 (<math>n=2</math>)</p>                                                                                                           |
| 27а. Цилиндр бесконечной длины или шар                                                                                                              |  | $\varphi_{12} = \frac{F_2}{F_1 + F_2}; \quad \varphi_{11} = \frac{F_1}{F_1 + F_2};$ $\varphi_{21} = \frac{F_1}{F_1 + F_2}; \quad \varphi_{22} = \frac{F_2}{F_1 + F_2};$ $F_{12} = \frac{F_1 \cdot F_2}{F_1 + F_2}$                                                                                                                                                                                                        |

| Взаимное расположение и форма поверхностей | Схема                                                                             | Угловые коэффициенты и расчетные поверхности                                                                                                                                                               |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 28. Шар внутри шара                        |  | $\Phi_{21} = \frac{F_1}{F_2}; \quad \Phi_{22} = 1 - \frac{F_1}{F_2};$ $\Phi_{11} = 0; \quad \Phi_{12} = 1; \quad F_{12} = F_1$                                                                             |
| 29. Куб или параллелепипед                 |  | $\Phi_{22} = 0; \quad \Phi_{21} = 1;$ $\Phi_{12} = \frac{F_2}{F_1}; \quad \Phi_{11} = 1 - \frac{F_2}{F_1};$ $F_{12} = F_{21}, \text{ где } F_1 - \text{сумма остальных пяти поверхностей параллелепипеда}$ |

\* Формулы действительны и в том случае, если 1, 2, 3, 4 и R представляют собой длинные цилиндрические поверхности с параллельными образующими. Схемы при этом следует рассматривать как поперечные сечения цилиндрических поверхностей, а  $F_1$ ,  $F_2$  и т. д. — относить к 1 м длины системы.

Рис. 147. Значения углового коэффициента  $\Phi$  для случая лучистого теплообмена между плоскими параллельными фигурами:

$a$  и  $D$  — сторона и диаметр фигуры;  $h$  — расстояние между плоскостями; 1—4 — при прямом лучистом обмене между поверхностями; 5—8 — при лучистом обмене между поверхностями с учетом отражения от соединяющей их нетеплопроводной оболочки; 1,5 — диски; 2,6 — квадраты; 3,7 — прямоугольники с отношением сторон 2:1; 4,8 — длинные узкие прямоугольники

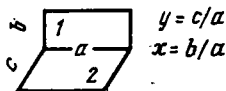
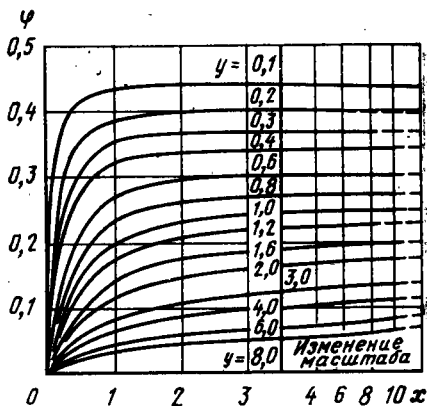
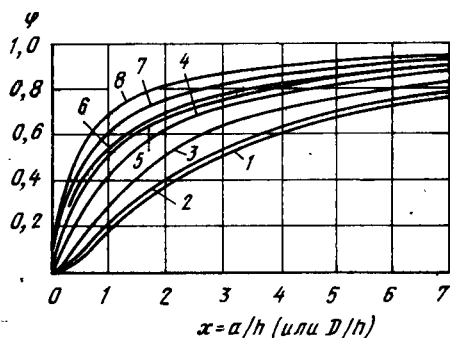


Рис. 148. Значения углового коэффициента  $\Phi$  для случая лучистого теплообмена между двумя взаимно перпендикулярными прямоугольниками с общей стороной  $a$

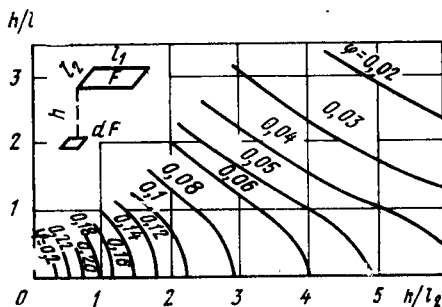


Рис. 149. Значения углового коэффициента  $\Phi$  для случая лучистого теплообмена между элементом  $dF$  и параллельным ему прямоугольником, через одну из вершин которого проходит нормаль к  $dF$

## Теплообмен излучением между серыми телами

Расчет лучистого теплообмена между двумя серыми телами, произвольно расположенными в пространстве, представляет чрезвычайно большие трудности, и точного решения в настоящее время не имеет. В практических расчетах используют понятие приведенной степени черноты системы тел  $\epsilon_{пр}$ , при помощи которой учитывают несовершенство поглощения лучистой энергии серыми телами и отраженные потоки:

$$Q_{12} = C_0 \cdot \epsilon_{пр} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_{12} \cdot \tau \text{ кДж.}$$

Для замкнутой системы двух серых тел приведенная степень черноты определяется из выражения

$$\epsilon_{пр} = \frac{1}{1 + \left( \frac{1}{\epsilon_1} - 1 \right) \varphi_{12} + \left( \frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right) \varphi_{21}}$$

Здесь  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  — соответственно степени черноты 1-го и 2-го серых тел, угловые коэффициенты и расчетная поверхность теплообмена определяются, как показано выше для абсолютно черных тел.

Для случая  $\varphi_{12}=1$  и  $\varphi_{21} = \frac{F_1}{F_2}$  имеем

$$\epsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)},$$

когда  $F_2 \gg F_1$ ,  $\epsilon_{пр} \approx \epsilon_1$ .

Для случая  $\varphi_{12}=\varphi_{21}=1$  получим (см. рис. 150)

$$\epsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} = \frac{1}{\left( \frac{1}{\epsilon_1} - \frac{1}{2} \right) + \left( \frac{1}{\epsilon_2} - \frac{1}{2} \right)}$$

В приближенных расчетах иногда принимают  $\epsilon_{пр} = \epsilon_1 \cdot \epsilon_2$ . Такое упрощение дает удовлетворительные результаты для серых тел с высокой степенью черноты.

В расчетах часто пользуются понятием приведенного коэффициента излучения в системе двух серых тел:  $C_{пр} = C_0 \cdot \epsilon_{пр}$ .

### Теплообмен при наличии экранов

Для уменьшения передачи тепла лучеиспусканием между излучающими поверхностями устанавливают экраны. При расчетах теплообмена считают, что экраны не обладают термическим сопротивлением:  $R \rightarrow 0$  и являются непрозрачными для теплового излучения. При равенстве степеней черноты поверхностей теплообмена  $N_s$  экранов приведенная степень черноты равна

$$\epsilon_{пр} = \frac{1}{2(N_s + 1) \left( \frac{1}{\epsilon} - \frac{1}{2} \right)}$$

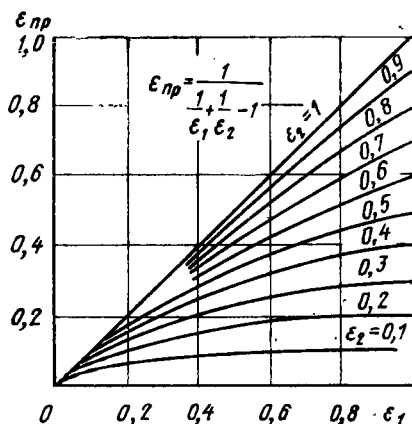


Рис. 150. Значения приведенной степени черноты  $\epsilon = f(\epsilon_1, \epsilon_2)$

Если степень черноты поверхностей различна, то расчетная формула имеет вид

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{\varepsilon_i} - \frac{1}{2} \right)},$$

где  $n$  — число мест сопротивлений переносу лучистой энергии, равное числу поверхностей на пути перехода тепловой энергии. При наличии одного экрана  $n=4$ , при двух экранах  $n=6$  и т. д.

### Излучение через отверстия

При излучении через отверстия в толстых стенах имеет место прямое излучение через основание отверстия на внутренней поверхности стены.

Кроме того, происходят дополнительные потери тепла вследствие отражения и излучения от боковых стен канала через отверстие в наружной поверхности печи.

Суммарные потери тепла в этом случае определяются по формуле

$$Q = C_0 \left( \frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 \cdot F_{\text{отв}} \cdot \Phi \text{ Вт},$$

где  $\Phi$  — коэффициент диафрагмирования отверстия с площадью  $F_{\text{отв}}$ , определяемый по графикам рис. 151.

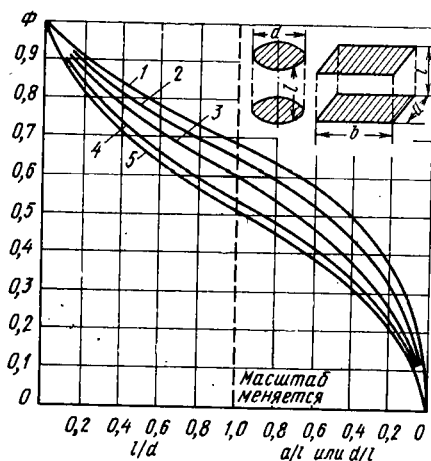


Рис. 151. Коэффициенты диафрагмирования  $\Phi$  при излучении через отверстия:  
1 — длинные полосы;  $a:b=0$ ; 2 — прямоугольники,  $a:b=0,2$ ; 3 — прямоугольники,  $a:b=0,5$ ; 4 — квадраты,  $a:b=1$ ; 5 — круги

### Излучение газов и паров

Все газы и пары обладают способностью поглощать и излучать лучистую энергию. Излучательная способность газов, молекулы которых состоят из одного или двух атомов, столь незначительна, что в теплотехнических расчетах они принимаются лучепрозрачными. Трех- и более атомные газы обладают значительной селективной излучательной и поглощательной способностью. Наибольший интерес представляет излучение углекислоты,  $\text{CO}_2$  и водяного пара,  $\text{H}_2\text{O}$ , входящих в состав продуктов сгорания. Излучение и поглощение лучистой энергии газами имеет избирательный, селективный характер. Лишь в определенных интервалах длин волн, так называемых полосок, расположенных в различных частях спектра, происходит поглощение и излучение энергии. В диапазонах этих полос излучения степень черноты газа различна. Для лучей

других длин волн, вне этих полос, газы прозрачны и их энергия излучения равна нулю. На рис. 152 показана поглощательная способность толстых слоев  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  в различных частях спектра и на рис. 153 излучательная способность  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  для слоев бесконечной толщины на всех длинах волн.

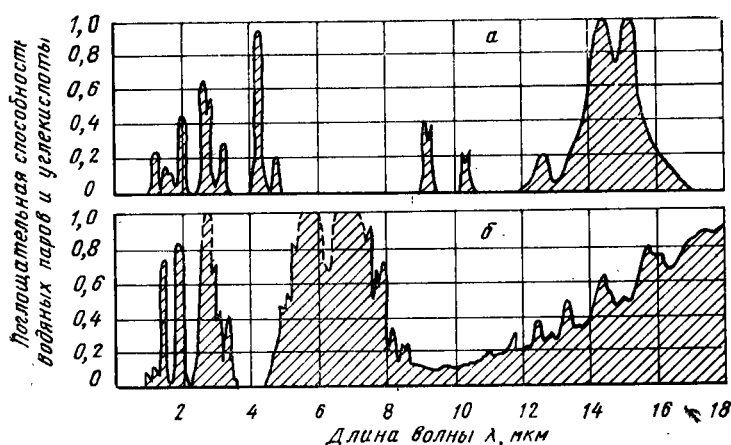


Рис. 152. Поглощательная способность толстых слоев  $\text{CO}_2$  (а) и  $\text{H}_2\text{O}$  (б) в различных частях спектра

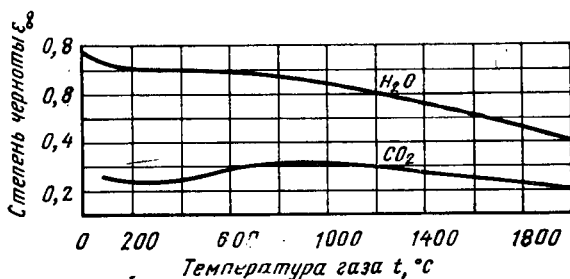


Рис. 153. Предельная наибольшая излучательная способность  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  для слоев бесконечной толщины

Энергия излучения водяных паров и углекислоты зависит от парциального давления газа  $p$ , Н/м<sup>2</sup>, толщины слоя,  $s$ , м, и температуры. Математически эта связь выражается формулами

$$E_{\text{CO}_2} = 4,1 (p \cdot s)^{1/3} \left( \frac{T}{100} \right)^{3,5} \text{ Вт/м}^2$$

и

$$E_{\text{H}_2\text{O}} = 40,7 p^{0,8} \cdot s^{0,6} \left( \frac{T}{100} \right)^3 \text{ Вт/м}^2.$$

Для расчетов теплообмена между серыми телами и газами применять эти формулы неудобно, поскольку все они имеют различный показатель степени у температуры. Для универсальности расчетов принимается, что лучеиспускательная способность углекислоты и водяных паров пропорциональна температуре  $T^4$ . Необходимая в этом случае поправка вводится в общую степень черноты газа  $\epsilon$ , которая учитывает также непостоянство  $\epsilon_\lambda$ , степени черноты газа для различных длин волн. Энергия излучения  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  определяется из выражений

$$E_{\text{CO}_2} = \epsilon_{\text{CO}_2} \cdot C_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4 \quad \text{и} \quad E_{\text{H}_2\text{O}} = \epsilon_{\text{H}_2\text{O}} \cdot C_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4.$$

Излучательная способность газа, содержащего  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , определяется по формуле

$$E_r = \varepsilon_r \cdot C_0 \left( \frac{T_r}{100} \right)^4,$$

где  $\varepsilon_r$  — относительная излучательная способность или степень черноты газа, полученная путем отнесения энергии излучения газа  $E_r$  к количеству энергии излучения  $E_0$  абсолютно черного тела при температуре газа.

Если углекислота и водяной пар содержатся в объеме одновременно, то степень черноты определяют из выражения

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \zeta - \Delta \varepsilon g.$$

Степени черноты углекислоты  $\text{CO}_2$  и водяного пара  $\text{H}_2\text{O}$  определяют по рис. 154 и 155.

Здесь  $\zeta$  — поправочный коэффициент, учитывающий неодинаковую степень влияния толщины газового слоя  $z$  и парциального давления  $p$  на энергию излучения водяных паров, определяемый по рис. 156; отклонение от закона Бугера

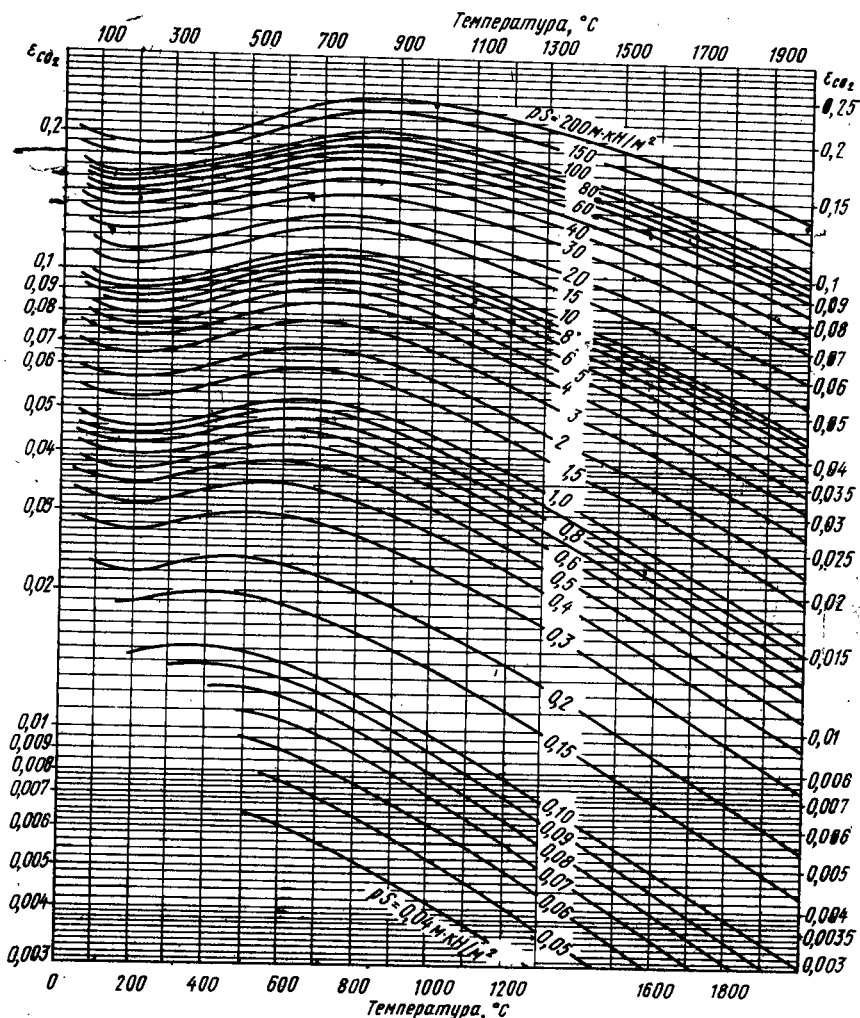


Рис. 154. Степень черноты углекислоты:  $\text{CO}_2$

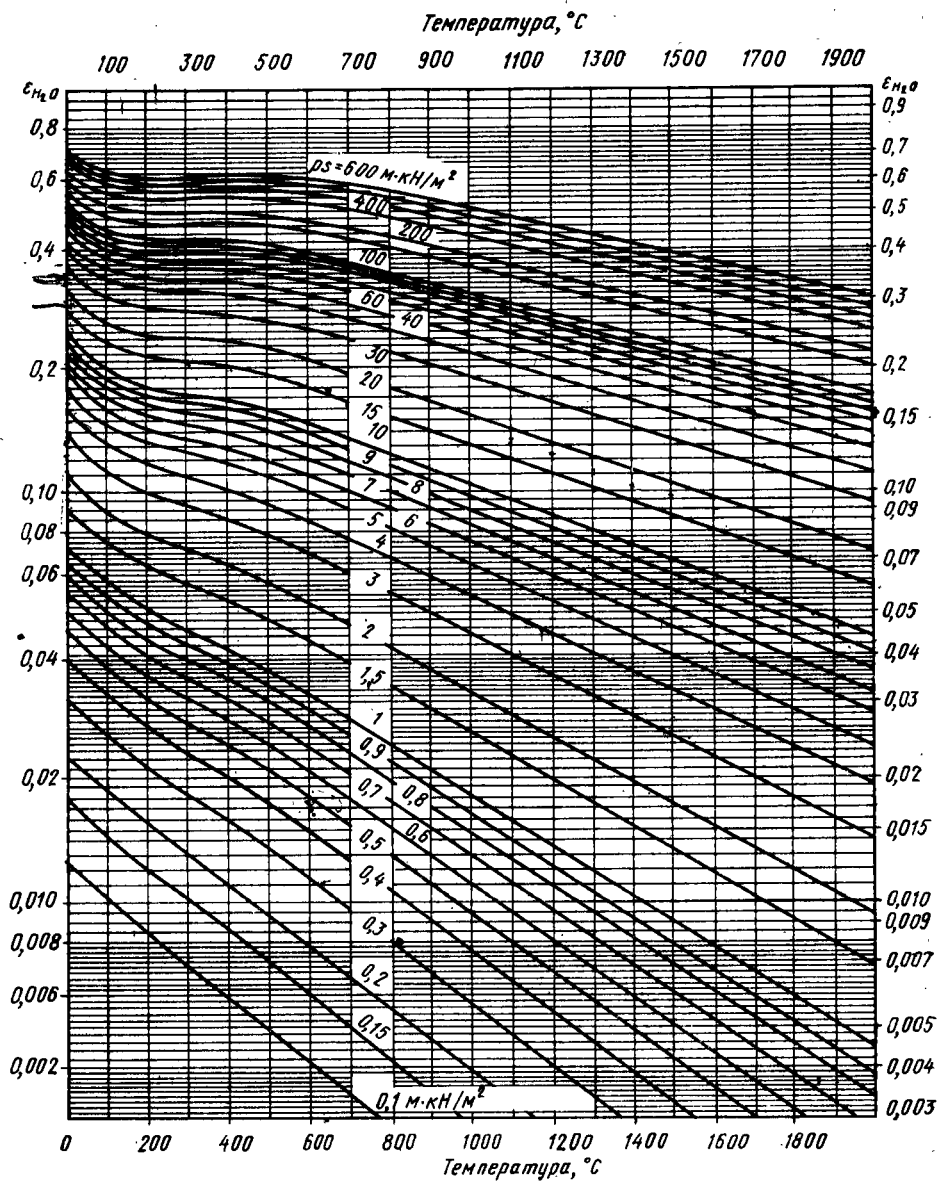


Рис. 155. Степень черноты водяного пара  $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$

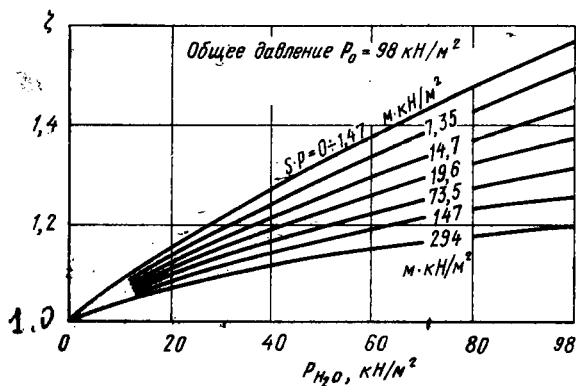


Рис. 156. Поправочный коэффициент  $\zeta$  на парциальное давление для водяного пара (общее давление  $P_0 = 98 \text{ кН/м}^2$ )

$\Delta \epsilon_g$  — поправка, учитывающая наложение полос излучения  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  при их совместном пребывании в излучающем объеме, определяемая по рис. 157.

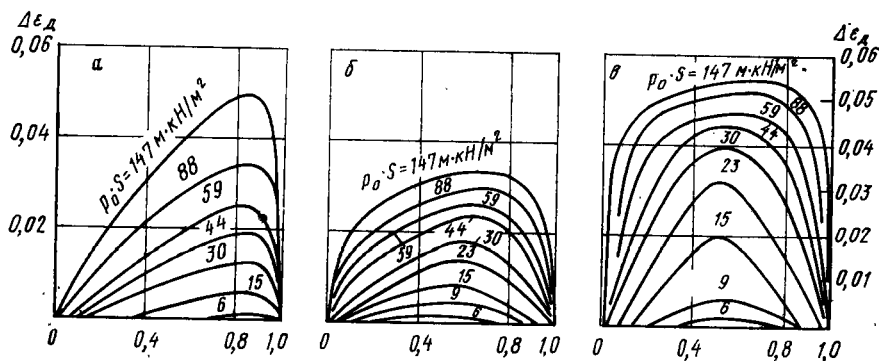


Рис. 157. Поправка на излучение смеси  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  при  $P_{\text{H}_2\text{O}} / (P_{\text{H}_2\text{O}} + P_{\text{CO}_2})$  и различной температуре, °C:  
а — 125°C; б — 540°C; в — 930°C.

При обычных соотношениях компонентов, какие наблюдаются в дымовых газах, поправка  $\Delta \epsilon_g$  незначительна ( $\sim 2-4\%$ ). Эту поправку следует учитывать лишь при очень точных расчетах и при больших значениях  $p_0 \cdot s$ , где  $p_0$  — общее давление газа.

При определении степени черноты газа в объеме под  $s$  подразумевают эффективную длину луча, определяемую из выражения

$$s = \eta_r \frac{4V}{F} \text{ м,}$$

где  $\eta_r$  — коэффициент эффективности газового излучения, характеризующий ту долю излучаемой энергии, которая достигает стенок;  
 $V$  — объем полости, заполненной излучающим газом,  $\text{м}^3$ ;  
 $F$  — площадь всех стенок, ограничивающих этот объем,  $\text{м}^2$ .

В ориентировочных расчетах принимают  $\eta_r = 0,9$ . Для более точных расчетов  $\eta_r$  принимается по рис. 158 в зависимости от степени черноты газового объема, которая определяется по предварительному значению  $\eta_r$ .

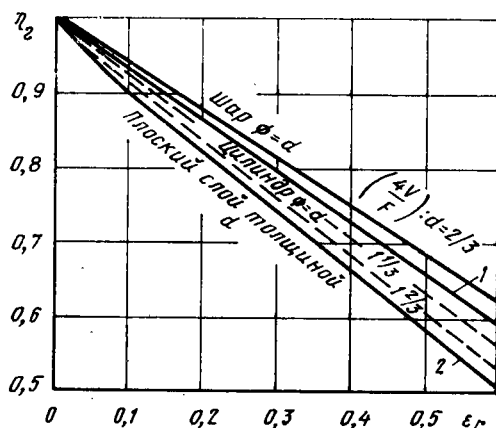


Рис. 158. Коэффициент эффективности  $\eta_r$  газового излучения в зависимости от формы газового объема и его степени черноты  $\epsilon_g$ :  
 $V$  — заполненный газом объем,  $\text{м}^3$ ;  $F$  — суммарная площадь окружающих его поверхностей,  $\text{м}^2$ ;  $d$  — наименьший поперечник заполненного газом объема,  $\text{м}$ .

Ниже приведена эффективная длина лучей для газовых объемов различной формы, вычисленная при  $\eta_r=0,9$ .

**Эффективная длина лучей  $s$  для газовых объемов различной формы**

| Форма газового тела                                                                               | $s$         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Сфера диаметром $d$                                                                               | $0,60d$     |
| Куб со стороной $a$                                                                               | $0,60a$     |
| Цилиндр диаметром $d$ , бесконечно длинный                                                        | $0,90d$     |
| Цилиндр высотой $h=d$ , излучение на боковую поверхность                                          | $0,60d$     |
| То же, излучение на центр основания                                                               | $0,77d$     |
| Цилиндр $h=\infty$ , основание — полукруг радиусом $r$ , излучение на плоскую боковую поверхность | $1,26r$     |
| Плоскопараллельный слой бесконечных размеров толщиной $\delta$                                    | $1,8\delta$ |
| Пучок труб диаметром $d$ с расстоянием между поверхностями труб $x$ и при расположении труб:      |             |
| а) по треугольнику $x=d$                                                                          | $2,8x$      |
| б) по треугольнику $x=2d$                                                                         | $3,8x$      |
| в) по квадрату $x=d$                                                                              | $3,5x$      |

**Теплообмен между серыми телами в замкнутом пространстве, заполненном лучепоглощающей средой**

При передаче тепла излучением в системе из двух серых тел, образующих замкнутое пространство, заполненное лучепоглощающей средой, математическое описание процессов встречается большие трудности. На практике такая задача встречается очень часто. Приведенные ниже формулы, полученные с некоторыми допущениями, позволяют рассчитывать такой случай теплообмена с достаточной для инженерных расчетов точностью.

Введем обозначения: индекс «к» для параметров, относящихся к кладке (рис. 159); индекс «м» для параметров металла; индекс «г» для параметра заполняющего объем газа.

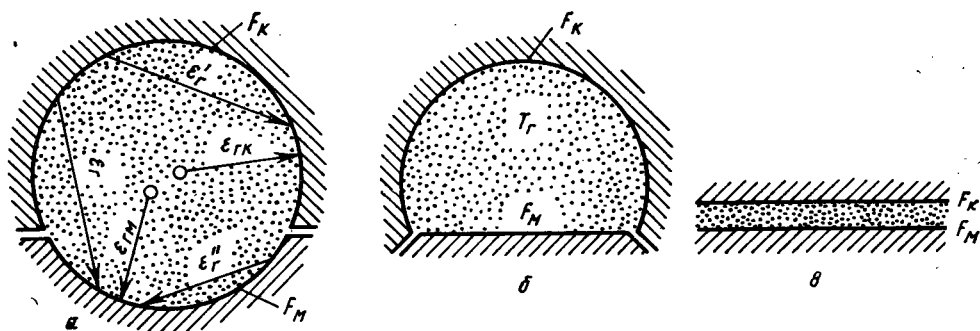


Рис. 159. Схема к передаче тепла излучением  $T_k > T_m$ ;  $T_g > T_k$ ;  $T_g > T_m$

Количество тепла, переданного от кладки к металлу, от газа к кладке и т. д., определяется из выражений:

$$Q_{к.м} = (E_k F_k \varphi_{к.м} - E_m F_m \varphi_{м.к}) \varepsilon_{к.м};$$

$$Q_{г.к} = (E_g - E_k) F_k \varepsilon_{г.к};$$

$$Q_{г.м} = (E_g - E_m) F_m \varepsilon_{г.м}.$$

Если предположить, что потери тепла кладкой компенсируются за счет передачи тепла к кладке конвекцией, то справедливы равенства:

$$Q_{г.к} = Q_{к.м};$$

$$Q_{г.м} + Q_{к.м} = Q_{г.м} + Q_{г.к} = Q_{г.к.м} = Q_m,$$

где

$$E_K = C_0 \left( \frac{T_K}{100} \right)^4;$$

$$E_M = C_0 \left( \frac{T_M}{100} \right)^4; \quad E_\Gamma = C_0 \left( \frac{T_\Gamma}{100} \right)^4; \quad C_0 = 5,67 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}.$$

Стоящие в формулах приведенные степени черноты определяют для различных случаев следующим образом.

I случай (см. рис. 159,а).  $\varphi_{M.M} \neq 0$ ;  $\varphi_{K.K} \neq 0$ ;

$$\varepsilon_{K.M} = \frac{\varepsilon_K \varepsilon_M (1 - \varepsilon_\Gamma)}{A};$$

$$\varepsilon_{\Gamma.K} = \frac{\varepsilon_K [1 - \varphi_{M.M} (1 - \varepsilon_\Gamma'') (1 - \varepsilon_M)] (\varphi_{K.K} \varepsilon_\Gamma' + \varphi_{K.M} \varepsilon_\Gamma)}{A} +$$

$$+ \frac{\varepsilon_K \varphi_{K.M} (1 - \varepsilon_\Gamma) (1 - \varepsilon_M) (\varphi_{M.M} \varepsilon_\Gamma'' + \varphi_{M.K} \varepsilon_\Gamma)}{A};$$

$$\varepsilon_{\Gamma.M} = \frac{\varepsilon_M [1 - \varphi_{K.K} (1 - \varepsilon_\Gamma') (1 - \varepsilon_K)] (\varphi_{M.M} \varepsilon_\Gamma'' + \varphi_{M.K} \varepsilon_\Gamma)}{A} +$$

$$+ \frac{\varepsilon_M \varphi_{M.K} (1 - \varepsilon_\Gamma) (1 - \varepsilon_K) (\varphi_{K.K} \varepsilon_\Gamma' + \varphi_{K.M} \varepsilon_\Gamma)}{A};$$

$$A = [1 - \varphi_{K.K} (1 - \varepsilon_\Gamma') (1 - \varepsilon_K)] [1 - \varphi_{M.M} (1 - \varepsilon_\Gamma'') (1 - \varepsilon_M)] -$$

$$- \varphi_{K.M} \varphi_{M.K} (1 - \varepsilon_\Gamma)^2 (1 - \varepsilon_K) (1 - \varphi_M).$$

При  $\varepsilon_\Gamma = \varepsilon_\Gamma' = \varepsilon_\Gamma''$ :

$$\varepsilon_{K.M} = \frac{\varepsilon_K \varepsilon_M (1 - \varepsilon_\Gamma)}{B}; \quad \varepsilon_{\Gamma.K} = \frac{\varepsilon_\Gamma \cdot \varepsilon_K}{B}; \quad \varepsilon_{\Gamma.M} = \frac{\varepsilon_\Gamma \cdot \varepsilon_M}{B};$$

$$B = [1 - \varphi_{K.K} (1 - \varepsilon_\Gamma) (1 - \varepsilon_K)] [1 - \varphi_{M.M} (1 - \varepsilon_\Gamma) (1 - \varepsilon_M)] -$$

$$- \varphi_{K.M} \cdot \varphi_{M.K} (1 - \varepsilon_\Gamma)^2 (1 - \varepsilon_K) (1 - \varepsilon_M);$$

$$\varepsilon_{\Gamma.K.M} = \frac{\varepsilon_\Gamma \varepsilon_M}{\varepsilon_\Gamma + \varphi_{K.M} \varepsilon_M (1 - \varepsilon_\Gamma)}.$$

При  $\varepsilon_\Gamma' = \varepsilon_\Gamma'' = \varepsilon_\Gamma''' = 0$ :

$$\varepsilon_{K.M} = \frac{\varepsilon_K \varepsilon_M}{[1 - \varphi_{K.K} (1 - \varepsilon_K)] [1 - \varphi_{M.M} (1 - \varepsilon_M)] - \varphi_{K.M} \varphi_{M.K} (1 - \varepsilon_K) (1 - \varepsilon_M)}.$$

Температура кладки определится:

$$T_K^4 = T_M^4 + (T_\Gamma^4 - T_M^4) \frac{\varepsilon_\Gamma}{\varepsilon_\Gamma + \varphi_{K.M} \varepsilon_M (1 - \varepsilon_\Gamma)}.$$

Количество тепла, полученное металлом:

$$Q_{\text{мет}} = (E_K - E_M) F_M \varepsilon_M.$$

II случай' (см. рис. 159,б):

$$\varphi_{M.M} = 0; \quad \varphi_{M.K} = 1; \quad \varphi_{K.M} = \frac{F_M}{F_K}.$$

$$\varepsilon_{K.M} = \frac{\varepsilon_K \varepsilon_M (1 - \varepsilon_\Gamma)}{D};$$

$$\varepsilon_{\Gamma.K} = \frac{\varepsilon_\Gamma \varepsilon_K [1 + \varphi_{K.M} (1 - \varepsilon_\Gamma) (1 - \varepsilon_M)]}{D};$$

$$\varepsilon_{г.м} = \frac{\varepsilon_{г} \varepsilon_{м} [1 + \varphi_{к.м} (1 - \varepsilon_{г}) (1 - \varepsilon_{к})]}{D};$$

$$D = 1 - \varphi_{к.к} (1 - \varepsilon_{г}) (1 - \varepsilon_{к}) - \varphi_{к.м} (1 - \varepsilon_{г})^2 (1 - \varepsilon_{к}) (1 - \varepsilon_{м});$$

$$\varepsilon_{г.к.м} = \frac{\varepsilon_{г} \varepsilon_{м} [1 + \varphi_{к.м} (1 - \varepsilon_{г})]}{\varepsilon_{г} + \varphi_{к.м} (1 - \varepsilon_{г}) [1 - (1 - \varepsilon_{г}) (1 - \varepsilon_{м})]}.$$

При  $\varepsilon_{г} = \varepsilon_{г}' = \varepsilon_{г}'' = 0$ :

$$\varepsilon_{к.м} = \frac{\varepsilon_{к} \varepsilon_{м}}{\varepsilon_{к} + \varphi_{к.м} \varepsilon_{м} (1 - \varepsilon_{к})} = \frac{\varepsilon_{к} \varepsilon_{м}}{1 - (1 - \varepsilon_{к}) (1 - \varphi_{к.м} \varepsilon_{м})};$$

$$T_{к}^4 = T_{м}^4 + (T_{г}^4 - T_{м}^4) \frac{1}{1 + \frac{\varphi_{к.м} \varepsilon_{м} (1 - \varepsilon_{г})}{\varepsilon_{г} [1 + \varphi_{к.м} (1 - \varepsilon_{г}) (1 - \varepsilon_{м})]}};$$

$$Q_{мет} = (E_{к} - E_{м}) F_{м} \frac{\varepsilon_{м} [1 + \varphi_{к.м} (1 - \varepsilon_{г})]}{1 + \varphi_{к.м} (1 - \varepsilon_{г}) (1 - \varepsilon_{м})}.$$

III случай (см. рис. 159, в).  $\varphi_{к.к} = \varphi_{м.м} = 0$ ;  $\varphi_{к.м} = \varphi_{м.к} = 1$ :

$$\varepsilon_{к.м} = \frac{\varepsilon_{к} \varepsilon_{м} (1 - \varepsilon_{г})}{Ж};$$

$$\varepsilon_{г.к} = \frac{\varepsilon_{г} \varepsilon_{к} [1 + (1 - \varepsilon_{г}) (1 - \varepsilon_{м})]}{Ж};$$

$$\varepsilon_{г.м} = \frac{\varepsilon_{г}' \varepsilon_{м} [1 + (1 - \varepsilon_{г}) (1 - \varepsilon_{к})]}{Ж};$$

$$Ж = 1 - (1 - \varepsilon_{г})^2 (1 - \varepsilon_{к}) (1 - \varepsilon_{м});$$

$$\varepsilon_{г.к.м} = \frac{\varepsilon_{г} \varepsilon_{м} (2 - \varepsilon_{г})}{1 - (1 - \varepsilon_{г})^2 (1 - \varepsilon_{м})}.$$

При  $\varepsilon_{г} = \varepsilon_{г}' = \varepsilon_{г}'' = 0$

$$\varepsilon_{к.м} = \frac{\varepsilon_{к} \varepsilon_{м}}{1 - (1 - \varepsilon_{к}) (1 - \varepsilon_{м})} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{к}} + \frac{1}{\varepsilon_{м}} - 1}.$$

### Коэффициент теплоотдачи излучением

При расчетах теплоотдачи, происходящей совместно конвекцией и излучением, удобно пользоваться коэффициентом теплоотдачи лучеиспусканием:

$$\alpha_{л} = \frac{q_{12}}{t_1 - t_2} \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{С)}.$$

Коэффициент теплоотдачи показывает, какое количество тепла в ки-  
лоджоулях передается излучением с 1 м<sup>2</sup> (или на 1 м<sup>2</sup>) поверхности тела  
в 1 ч при разности температур поверхностей, отдающей и воспринимаю-  
щей тепло, равной 1°С.

Суммарное количество тепла, переданного излучением и конвекцией,  
равно

$$Q = Q_{л} + Q_{к} = \alpha (t_1 - t_2) F \cdot \tau \text{ кДж,}$$

где  $\alpha = \alpha_{к} + \alpha_{л}$ .

Значения коэффициентов теплоотдачи приведены на рис. 160 в за-  
висимости от температуры печи и температуры нагреваемого изделия и  
на рис. 161 для решетки регенераторов.

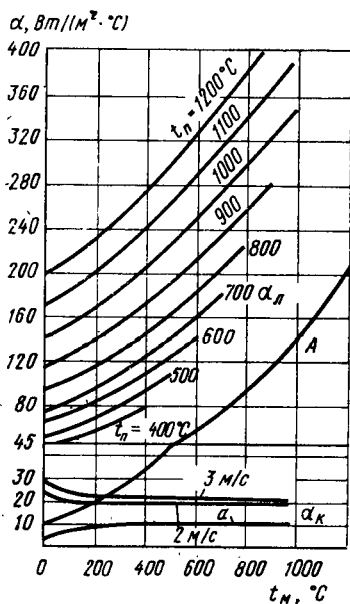


Рис. 160. Коэффициент теплоотдачи излучением  $\alpha_{\text{л}}$  в зависимости от температуры кладки печи  $t_{\text{п}}$ ; конвекцией  $\alpha_{\text{к}}$  в зависимости от скорости движения воздуха ( $a$  — неподвижный воздух):  $A$  — суммарный коэффициент теплоотдачи при охлаждении в спокойном воздухе;  $t_{\text{м}}$  — температура поверхности металла

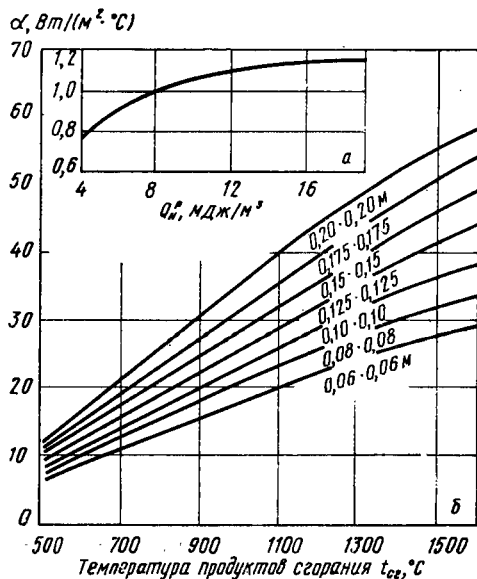


Рис. 161. Коэффициент теплоотдачи излучением в регенеративных решетках:  $a$  — поправка в зависимости от  $Q_{\text{п}}^{\text{P}}$  — теплоты сгорания смеси коксового и доменного газов

## КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

В сложных случаях теплообмена, при передаче тепла от одной среды к другой через разделительную стенку, тепловой поток определяют из выражения

$$q = K (t_{\text{г}} - t_{\text{в}}) \text{ Вт/м}^2,$$

где  $K$  — коэффициент теплопередачи, определяемый по формуле

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha'}} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}.$$

Здесь  $\alpha$  и  $\alpha'$  — суммарные коэффициенты теплоотдачи с одной и другой сторон разделительной стенки;

$s/\lambda$  — тепловое сопротивление.

Коэффициент теплопередачи  $K$  показывает, какое количество тепла в килоджоулях передается через 1 м<sup>2</sup> поверхности разделительной стенки от одной среды к другой при разности температур между ними в 1°C за 1 ч. Ориентировочно коэффициент теплопередачи  $K$  имеет следующие значения, Вт/(м<sup>2</sup>·°C), при теплопередаче:

|                              |      |                           |      |
|------------------------------|------|---------------------------|------|
| От газа к газу . . . . .     | 30   | От конденсирующихся паров |      |
| От газа к воде . . . . .     | 60   | к воде . . . . .          | 3000 |
| От керосина к воде . . . . . | 350  | От конденсирующихся паров |      |
| От воды к воде . . . . .     | 1200 | к маслам . . . . .        | 350  |

Коэффициент теплопередачи для игольчатых рекуператоров можно подсчитывать как для обрешенной поверхности.

## НАГРЕВ И ОХЛАЖДЕНИЕ ТЕЛ

### МЕТОДЫ РАСЧЕТОВ НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ

Основной задачей расчетов нагрева или охлаждения изделий является нахождение изменения температур во времени по сечению изделия. При нагреве по сечению изделия возникает перепад температур  $\Delta t = t_{\text{пов}} - t_{\text{ц}}$ , т. е. разность между более прогретыми поверхностями  $t_{\text{пов}}$  и менее нагретыми внутренними  $t_{\text{ц}}$  слоями. Перепад температур в теле определяется тепловым сопротивлением изделия  $S/\lambda$  и зависит от условий нагрева: теплового потока  $q$ ; скорости нагрева  $C_n$ , коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  и др. Во многих случаях разность температур по сечению изделия оказывается столь незначительной, что в практических расчетах ее принимают равной нулю ( $\Delta t \approx 0$  и  $t_{\text{пов}} \approx t_{\text{ц}}$ ). Такие изделия называют «тонкими». «Тонкое» изделие характеризуется либо небольшой толщиной прогреваемого слоя  $S$ , либо очень высоким коэффициентом теплопроводности  $\lambda$ . Материалы ведут себя при нагреве как «тонкие» изделия при условии, что критерий Био, учитывающий отношение сопротивлений, имеет значения  $\frac{\alpha S}{\lambda} \leq 0,25$ . Если значения критерия Био  $Bi \geq 0,50$ , то тела в процессе нагрева ведут себя как «массивные изделия», для которых нельзя пренебрегать перепадом температур по сечению тела.

При нагреве и охлаждении изделий используют одинаковые математические зависимости, отличающиеся лишь знаком. При нагреве происходит поглощение тепла изделием  $(+q; +Q)$  и повышение его энтальпии  $(+\Delta i, +\Delta I)$ , а при охлаждении — отдача тепла  $(-q; -Q)$  и понижение его энтальпии  $(-\Delta i; -\Delta I)$ .

При нагреве массивных изделий распределение температур по сечению тела принимается по параболе II степени. Такое распределение температур строго справедливо для условий нагрева при постоянном тепловом потоке  $q = \text{const}$  либо при постоянной скорости нагрева изделий  $C_n = \text{const}$ . При параболическом симметричном законе распределения температур в теле средняя по сечению температура определяется следующим образом:

для пластины

$$t_{\text{ср}} = t_{\text{ц}} + \frac{\Delta t}{3} = t_{\text{пов}} - \frac{2}{3} \Delta t;$$

для цилиндра

$$t_{\text{ср}} = t_{\text{ц}} + \frac{\Delta t}{2} = t_{\text{пов}} - \frac{\Delta t}{2};$$

для шара

$$t_{\text{ср}} = t_{\text{ц}} + \frac{3}{5} \Delta t = t_{\text{пов}} - \frac{2}{5} \Delta t.$$

где  $\Delta t = t_{\text{пов}} - t_{\text{ц}}$ .

В общем случае среднюю по сечению тела температуру определяют по формуле

$$t_{\text{ср}} = t_{\text{ц}} + \frac{\Delta t}{k_3} = t_{\text{пов}} - \left(1 - \frac{1}{k_3}\right) \Delta t;$$

$$\Delta t = q_{\text{ср}} \frac{s}{\lambda} = \frac{q_{\text{пов}} s}{k_2 \lambda},$$

где  $k_3$  — коэффициент усреднения разности температур в теле (табл. XIII-1);

$k_2$  — коэффициент усреднения теплового потока по сечению тела;

$Bi=0$  — соответствует нагреву при условии  $q_{\text{пов}}=\text{const}$ .

$Bi=\infty$  — соответствует нагреву при условии  $t_{\text{пов}}=\text{const}$ .

Таблица XIII-1

Значения коэффициентов усреднения температур  $k_3$  и тепловых потоков  $k_2$  в регулярном режиме при условии нагрева  $t_{\text{пов}}=\text{const}$

| $Bi = \frac{\alpha S}{\lambda}$ | Плита  |       | Цилиндр |       | Шар   |       |
|---------------------------------|--------|-------|---------|-------|-------|-------|
|                                 | $k_2$  | $k_3$ | $k_2$   | $k_3$ | $k_2$ | $k_3$ |
| 0                               | 2      | 3     | 2       | 2     | 2     | 1,670 |
| 0,5                             | 1,928  | 2,955 | 1,890   | 1,963 | 1,864 | 1,634 |
| 1,0                             | 1,864  | 2,926 | 1,800   | 1,935 | 1,752 | 1,608 |
| 5,0                             | 1,703  | 2,827 | 1,449   | 1,835 | 1,34  | 1,511 |
| 10                              | 1,647  | 2,795 | 1,387   | 1,803 | 1,19  | 1,478 |
| 100                             | 1,579  | 2,757 | 1,263   | 1,764 | 1,01  | 1,440 |
| $\infty$                        | 1,5708 | 2,752 | 1,250   | 1,762 | 1,00  | 1,433 |

Толщину прогреваемого слоя  $S$  принимают равной половине толщины изделия при равномерном двустороннем нагреве. При одностороннем нагреве толщина прогреваемого слоя равна полной толщине изделия.

При несимметричном нагреве толщину прогреваемого слоя определяют из соотношения

$$S = \mu H,$$

где  $H$  — толщина изделия в направлении действия теплового потока, м;

$\mu = \frac{q_1}{q_1 + q_2}$  — коэффициент несимметричности нагрева

$q_1$  и  $q_2$  — тепловые потоки на противоположные поверхности нагреваемого изделия.

При расчете процессов нагрева используют величины теплофизических свойств веществ: коэффициент теплопроводности  $\lambda$  Вт/(м·°С); коэффициент температуропроводности  $a = \lambda / \rho c$  м²/с; теплоемкость  $c$  кДж/(кг·°С); плотность  $\rho$  кг/м³ и коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  Вт/(м²·°С).

Значения этих параметров в формулах принимают постоянными, не зависящими от температуры. Чтобы учесть влияние температуры на теплофизические свойства вещества, в расчетах используют средние величины за интервал нагрева. В зависимости от того, каков характер изменения величины, применяют различные способы усреднения. Естественно, что определенные различными методами средние величины имеют неодинаковые значения и порой могут резко отличаться друг от друга (рис. 162).

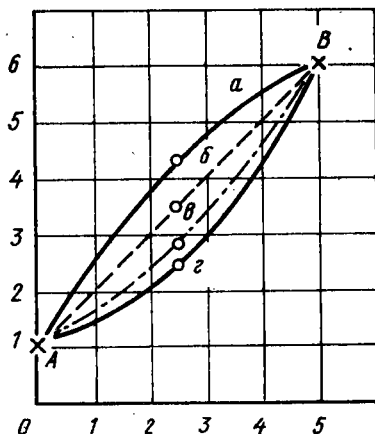
Чем больше интервалов нагрева, на которые разбивается весь процесс нагрева, тем ближе средние значения величин теплофизических

свойств к истинным, тем точнее расчет. Практически рекомендуется весь процесс нагрева разбивать не менее, чем на три интервала.

Усреднение коэффициента теплопроводности материала осуществляют по сечению (для температур поверхности  $t_{\text{пов}}$  и оси  $t_{\text{ц}}$ ) и во време-

Рис. 162. Усреднение двух величин  $A$  (0; 1) и  $B$  (5; 6) различными способами:

$a$  — среднеквадратичное  $\sqrt{\frac{A^2+B^2}{2}} = 4,30$ ;  $b$  — среднеарифметическое  $\frac{A+B}{2} = 3,50$ ;  $\alpha$  — среднелогарифмическое  $\frac{B-A}{\ln \frac{B}{A}} = 2,79$ ;  $z$  — среднегеометрическое  $\sqrt{AB} = 2,45$



ни (для  $\tau_1$  и  $\tau_2$ ). Таким образом, средний коэффициент теплопроводности определяется так:

$$\lambda_{\text{ср}} = \frac{1}{4} (\lambda_{t_{\text{пов}1}} + \lambda_{t_{\text{ц}1}} + \lambda_{t_{\text{пов}2}} + \lambda_{t_{\text{ц}2}}).$$

Средний по сечению тела тепловой поток находится по формуле

$$q_{\text{ср}} = \frac{q_{\text{пов}}}{k_2}$$

(значения  $k_2$  см. в табл. XIII-1).

Теплоемкость в расчетах принимается средняя для крайних температур интервала нагрева. Усреднение выполняют либо по температурам поверхности  $t_{\text{пов}}$ , либо по средним температурам  $t_{\text{ср}}$  изделия:

$$C_{\text{пов}} = \frac{\Delta i}{t_{\text{пов.к}} - t_{\text{пов.н}}} \quad \text{и} \quad C_{\text{ср}} = \frac{\Delta i}{t_{\text{ср.к}} - t_{\text{ср.н}}},$$

где индексы «н» и «к» относятся к температурам в начале и конце интервала нагрева:

$$\Delta i = i_{\text{к}} - i_{\text{н}}; \quad i_{\text{к}} = c_0^{\text{к}} t_{\text{к}}; \quad i_{\text{н}} = c_0^{\text{н}} t_{\text{н}}.$$

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{\text{ср}}$  определяется как среднеарифметическое из значений для крайних точек интервала нагрева:

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{\alpha_{\text{н}} + \alpha_{\text{к}}}{2}.$$

Тепловой поток в интервале нагрева определяется как среднелогарифмическое из крайних значений, если они отличаются один от другого более чем в два раза:

$$q_{\text{ср}} = \frac{q_{\text{н}} - q_{\text{к}}}{2,3 \lg \frac{q_{\text{н}}}{q_{\text{к}}}};$$

в противном случае выполняют среднеарифметическое усреднение.

При выполнении точных расчетов необходимо знать характер залегания функции и в соответствии с этим выбирать способ усреднения величин (рис. 162).

В дальнейшем температура окружающей среды, в которой происходит нагрев или охлаждение изделия, обозначается через  $t_n$ . В зависимости от того, какое понятие вкладывается в эту величину — температура дымовых газов, эффективная температура печи, температура жидкой ванны или температура воздушной среды при охлаждении, определяют приведенный коэффициент излучения  $C_{пр}$ , тепловой поток  $q$  и коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ .

## НАГРЕВ ТОНКИХ ИЗДЕЛИЙ

### Нагрев тонких изделий в печи с постоянной температурой

Температура изделия в этом случае нагрева может быть определена по формуле

$$t = t_n - (t_n - t_k) \exp \left( - \frac{k_1 \alpha \tau}{S \rho c} \right) ^\circ \text{C},$$

где  $k_1$  — коэффициент материальной нагрузки, зависящий от формы тела, значения  $k_1$  см. в табл. XIII-2.

Таблица XIII-2

Значения коэффициентов  $k_1$  и  $k$  для различных форм тел

| Форма тела                                                          | $k_1$ | $k$   | Форма тела                                      | $k_1$ | $k$   |
|---------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------------------------------------------------|-------|-------|
| Прямоугольная призма бесконечной длины с отношением стороны $B/S$ : |       |       | Цилиндр с отношением высоты к диаметру $H/2R$ : |       |       |
| 1,00 . . . . .                                                      | 1,70  | 0,294 | 1,00 . . . . .                                  | 2,49  | 0,200 |
| 1,25 . . . . .                                                      | 1,41  | 0,355 | 1,25 . . . . .                                  | 2,14  | 0,233 |
| 1,50 . . . . .                                                      | 1,22  | 0,409 | 1,50 . . . . .                                  | 2,04  | 0,245 |
| 1,75 . . . . .                                                      | 1,14  | 0,438 | $\infty$ . . . . .                              | 2,00  | 0,250 |
| 2,00 . . . . .                                                      | 1,10  | 0,454 | Куб . . . . .                                   | 2,26  | 0,221 |
| Бесконечно большая пластина . . . . .                               | 1,00  | 0,500 | Шар . . . . .                                   | 3,00  | 0,167 |

Время нагрева определяется по формуле (при преобладании конвекции)

$$\tau = \frac{S \rho c}{k_1 \alpha} 2,3 \lg \frac{t_n - t_k}{t_n - t_k} \text{ ч.}$$

Время нагрева может быть также определено из выражения (при преобладании излучения)

$$\tau = \frac{S \rho c}{k_1 C_{пр}} \frac{100}{\left( \frac{T_n}{100} \right)^3} \left[ \psi \left( \frac{T_k}{T_n} \right) - \psi \left( \frac{T_n}{T_n} \right) \right] \text{ ч.}$$

где

$$\psi \left( \frac{T}{T_n} \right) = \frac{1}{4} \ln \frac{1 + \frac{T}{T_n}}{1 - \frac{T}{T_n}} + \frac{1}{2} \arctg \frac{T}{T_n}.$$

Значения функции  $\psi(T/T_n)$  приведены в табл. XIII-3.

Таблица. XIII-3

Значения функции  $\psi(y) = \psi(T/T_n)$ 

| $y$  | $\psi(y)$ | $y$  | $\psi(y)$ | $y$  | $\psi(y)$ | $y$  | $\psi(y)$ | $y$    | $\psi(y)$ |
|------|-----------|------|-----------|------|-----------|------|-----------|--------|-----------|
| 0,20 | 0,2000    | 0,42 | 0,4226    | 0,64 | 0,6639    | 0,84 | 0,9599    | 0,97   | 1,431     |
| 0,22 | 0,2201    | 0,44 | 0,4434    | 0,66 | 0,6882    | 0,86 | 1,0020    | 0,98   | 1,537     |
| 0,24 | 0,2402    | 0,46 | 0,4642    | 0,68 | 0,7132    | 0,88 | 1,0389    | 0,985  | 1,612     |
| 0,26 | 0,2602    | 0,48 | 0,4854    | 0,70 | 0,7389    | 0,90 | 1,1024    | 0,990  | 1,713     |
| 0,28 | 0,2803    | 0,50 | 0,5066    | 0,72 | 0,7655    | 0,91 | 1,1332    | 0,992  | 1,770     |
| 0,30 | 0,3005    | 0,52 | 0,5277    | 0,74 | 0,7936    | 0,92 | 1,1659    | 0,994  | 1,842     |
| 0,32 | 0,3207    | 0,54 | 0,5497    | 0,76 | 0,8229    | 0,93 | 1,2046    | 0,996  | 1,944     |
| 0,34 | 0,3409    | 0,56 | 0,5718    | 0,78 | 0,8538    | 0,94 | 1,2463    | 0,998  | 2,117     |
| 0,36 | 0,3612    | 0,58 | 0,5938    | 0,80 | 0,8864    | 0,95 | 1,2959    | 0,999  | 2,293     |
| 0,38 | 0,3816    | 0,60 | 0,6166    | 0,82 | 0,9224    | 0,96 | 1,3563    | 0,9995 | 2,465     |
| 0,40 | 0,4012    | 0,62 | 0,6400    |      |           |      |           |        |           |

**Нагрев тонких изделий в печи с переменной температурой**

При изменении температуры печи по закону прямой линии:

$$t_n = t_{n.n} + \theta \tau,$$

где  $\theta$  — скорость роста температуры печи.

Температура изделия  $t$  определится по формуле

$$t = t_{n.n} + \theta \tau - \theta \frac{1}{m} - \left( t_{n.n} - t_n - \theta \frac{1}{m} \right) \exp(-m \tau),$$

где  $t_n$  — начальная температура изделия и  $m = \alpha k_1 / S \rho c$ .

При  $m\tau \geq 4$  можно пользоваться следующими формулами:

$$t = t_{n.n} + \theta \tau - \theta \frac{S \rho c}{k_1 \alpha}$$

и

$$t_n - t = \theta \frac{S \rho c}{k_1 \alpha}.$$

**НАГРЕВ МАССИВНЫХ ИЗДЕЛИЙ****Методы расчетов нагрева, основанные на решении основного дифференциального уравнения теплопроводности**

В твердых телах передача тепла происходит посредством теплопроводности. Если при передаче тепла в теле не происходит изменения температур во времени:  $dt/d\tau = 0$ , то тепловое состояние называют стационарным. При нестационарном тепловом состоянии  $dt/d\tau \neq 0$ , температура тела меняется во времени, происходит изменение энтальпии тела. Такие процессы связаны с нагревом или охлаждением тел. Аналитическая зависимость изменения температуры и количества переданного тепла во времени для любой точки тела может быть получена на основании решения основного дифференциального уравнения теплопроводности, которое в декартовой системе координат имеет следующий вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) = a \nabla^2 t,$$

где  $\nabla^2$  — дифференциальный оператор Лапласа.

В цилиндрической системе координат уравнение теплопроводности имеет вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right).$$

Для получения однозначного решения уравнения теплопроводности его необходимо решать совместно с уравнениями краевых условий, состоящих из: а) начальных условий; б) поверхностных или граничных условий.

Существует четыре способа задания поверхностных условий:

- 1) поверхностные условия первого рода, когда задано распределение температур на поверхности тела, как функция времени:  $t_{\text{пов}} = f_1(\tau)$ ;
- 2) поверхностные условия второго рода, когда задан тепловой поток:  $q = f_2(\tau)$ ;
- 3) поверхностные условия третьего рода, когда задан закон изменения температуры окружающей среды:  $t_{\text{н}} = f_3(\tau)$  и закон теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой;
- 4) поверхностные условия четвертого рода характеризуют условия теплообмена тела с окружающей средой по закону теплопроводности.

## Поверхностные условия I рода

### а. Постоянная температура поверхности тела

Для поверхностных условий I рода, когда задано изменение температуры поверхности тела во времени, общее решение одномерной задачи для плиты бесконечных размеров имеет следующий вид:

$$t = \varphi(\tau) + \frac{1}{S} \sum_{l=1}^{\infty} \cos \delta_l \frac{x}{S} \exp \left( -\delta_l^2 \frac{a \tau}{S^2} \right) \int_{-S}^{+S} \times \\ \times [F(x) - \varphi_0] \cos \delta_l \frac{x}{S} dx - 2 \sum_{l=1}^{\infty} \frac{(-1)^{l+1}}{\delta_l} \cos \delta_l \times \\ \times \frac{x}{S} \exp \left( -\delta_l^2 \frac{a \tau}{S^2} \right) \int_0^{\pi} \exp \left( \delta_l^2 \frac{a \tau}{S^2} \right) \varphi'(\tau) d\tau.$$

Здесь:

изменение температуры  $t$  в точках  $x = \pm S$  во времени задано функцией  $\varphi(\tau)$ , т. е. поверхностные условия

$$t_{x=\pm S} = \varphi(\tau);$$

в начальный момент нагрева при  $\tau=0$  температура по сечению тела задана функцией  $F(x)$ , т. е. начальные условия

$$t_{\tau=0} = F(x);$$

$l$  — нормальный ряд чисел,  $l = 1, 2, 3, \dots$ ;

$$\delta_l = \frac{2l-1}{2} \pi;$$

$S$  — толщина прогреваемого слоя;

$x$  — текущая координата точки, для которой определяется температура  $t$ ;

$\tau$  — время;

$a$  — коэффициент температуропроводности;

$a\tau/S^2 = Fo$  — критерий Фурье.

Экспоненция  $x$  равна  $\exp x = e^x$ .

Аналогичное решение в общем виде для сплошного цилиндра бесконечной длины радиусом  $R$  выражается следующим образом:

$$t = \varphi(\tau) + \frac{2}{R^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{J_1^2(\mu_n)} J_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) \exp\left(-\mu_n^2 \frac{a\tau}{R^2}\right) \times \\ \times \int_0^R [F(r) - \varphi(0)] J_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) r dr - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n J_1(\mu_n)} \times \\ \times J_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) \exp\left(-\mu_n^2 \frac{a\tau}{R^2}\right) \int_0^{\tau} \exp\left(\mu_n^2 \frac{a\tau}{R^2}\right) \varphi'(\tau) d\tau,$$

где  $r$  — текущий радиус точек, для которых определяется температура;  
 $J_0(\mu_n)$  и  $J_1(\mu_n)$  — функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка;

$\frac{a\tau}{R^2} = Fo$  — критерий Фурье.

Ниже приведены решения, графики и формулы для частных решений дифференциального уравнения при конкретных случаях задания начальных условий и поверхностных условий I рода.

I случай. При мгновенном изменении температуры на поверхности бесконечно большой пластины до  $t_{\text{пов}}$  и равномерном распределении температур в начальный момент, т. е.  $t_{x=\pm S} = t_n = \text{const}$  и  $t_{\tau=0} = t_n = \text{const}$ , решение имеет вид:

$$\vartheta = \frac{t_{\text{пов}} - t}{t_{\text{пов}} - t_n} = \sum_{l=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{l+1}}{\delta_l} \cos \delta_l \frac{x}{S} \exp\left(-\delta_l^2 \frac{a\tau}{S^2}\right),$$

или, будучи выражено в общей форме,

$$\vartheta = \frac{t_{\text{пов}} - t}{t_{\text{пов}} - t_n} = \Phi\left(\frac{a\tau}{S^2}; \frac{x}{S}\right),$$

где  $t$  — искомая температура;

$\vartheta$  — безразмерная температура.

Графически приведенное уравнение представлено на рис. 163, а.

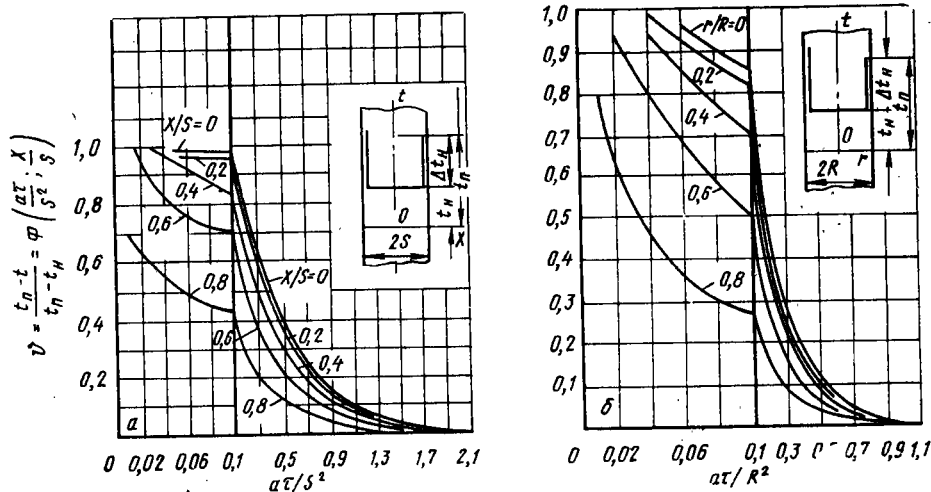


Рис. 163. Безразмерная температура  $\vartheta = \frac{t_{\text{пов}} - t}{t_{\text{пов}} - t_n}$  (I случай):

а — для пластины; б — для цилиндра

Для аналогичных условий решение для бесконечного цилиндра радиусом  $R$  имеет вид:

$$\vartheta = \frac{t_{\text{пов}} - t}{t_{\text{пов}} - t_{\text{н}}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n J_1(\mu_n)} J_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) \exp\left(-\mu_n^2 \frac{a\tau}{R^2}\right) = \Phi_1\left(\frac{a\tau}{R^2}; \frac{r}{R}\right).$$

Значения безразмерной температуры  $\vartheta$  для цилиндра бесконечной длины представлены на рис. 163, б.

При значениях  $Fo > 0,06$  для плиты и  $Fo > 0,08$  для цилиндра безразмерные температуры можно вычислять по следующим формулам: для плиты толщиной  $2S$

$$\vartheta = \frac{t_{\text{пов}} - t}{t_{\text{пов}} - t_{\text{н}}}; \quad \vartheta = 1,27 \exp\left(-2,47 \frac{a\tau}{S^2}\right);$$

для цилиндра радиусом  $R$

$$\vartheta = 1,61 \exp\left(-5,76 \frac{a\tau}{R^2}\right);$$

для цилиндра радиусом  $R$  и высотой  $2H$

$$\vartheta = 2,05 \exp\left(-2,47 \frac{a\tau}{H^2} - 5,76 \frac{a\tau}{R^2}\right);$$

для призмы сечением  $2S \times 2B$

$$\vartheta = 1,61 \exp\left[-2,47 \left(\frac{a\tau}{S^2} + \frac{a\tau}{B^2}\right)\right];$$

для параллелепипеда  $2S \times 2B \times 2L$

$$\vartheta = 2,05 \exp\left[-2,47 \left(\frac{a\tau}{S^2} + \frac{a\tau}{B^2} + \frac{a\tau}{L^2}\right)\right].$$

Здесь  $\exp x = e^x$ .

Относительные температуры при значении симплекса  $x/S = 0$  представлены на рис. 164 для тел различной формы.

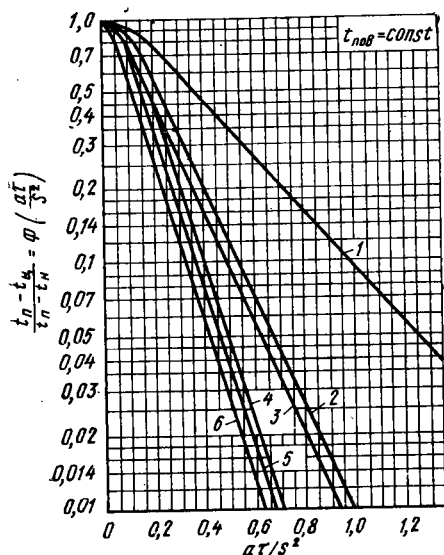


Рис. 164. Значения функции  $\Phi = \left(\frac{a\tau}{S^2}\right)$  при нагреве  $t_{\text{пов}} = \text{const}$  для различных форм тела при  $\frac{x}{S} = 0$ :

1 — плита; 2 — квадратный брус; 3 — цилиндр; 4 — куб; 5 — цилиндр высотой  $H$ ; 6 — шар

II случай. Постоянная температура на поверхности тела при параболическом распределении температур в начальный момент (выравнивание температур):

$$t_{\tau=0} = F(x) = t_{н.ц} + \Delta t_n \frac{x^2}{S^2};$$

$$t_x = \pm S = \varphi(\tau) = t_{пов},$$

где  $\Delta t_n = t_{пов} - t_{н.ц}$ ,

$t_{пов}$  — значение температуры на поверхности тела.

Решение задачи для безразмерной температуры

$$\vartheta = \frac{t_{пов} - t}{t_{пов} - t_{н.ц}} = \frac{\Delta t'}{\Delta t_n} = \Phi_2\left(\frac{a\tau}{S^2}; \frac{x}{S}\right)$$

для пластины, бесконечно большой длины и ширины представлено графически на рис. 165,а и для цилиндра бесконечной длины на рис. 165,б.

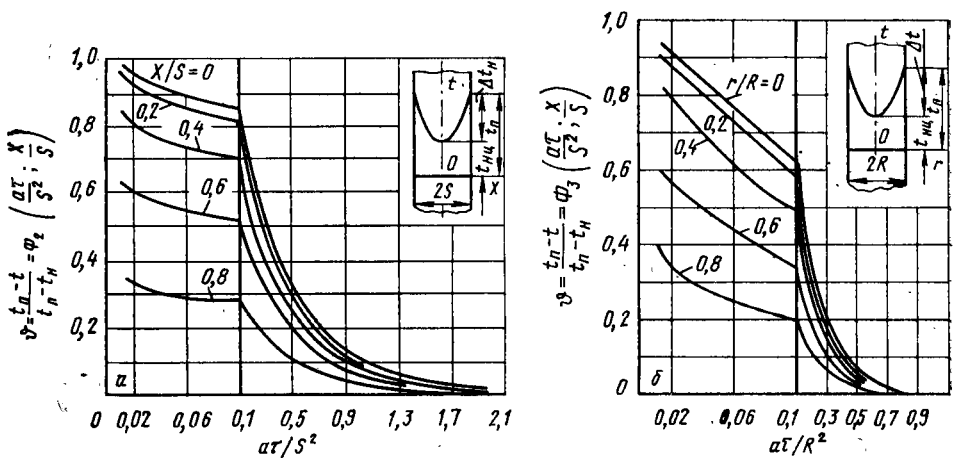


Рис. 165. Безразмерная температура  $\vartheta = \frac{t_{пов} - t}{t_{пов} - t_{нач}}$  при постоянной температуре поверхности (II случай): а — для пластины; б — для цилиндра

Здесь  $\Delta t'$  — разность температур между поверхностью и точкой, имеющей координату  $x$  или  $r$ . Полный перепад температур  $\Delta t = t_{пов} - t_{н.ц}$  может быть определен по рис. 166, где представлена зависимость.

$$\delta = \frac{\Delta t}{\Delta t_n} = \Phi\left(\frac{a\tau}{S^2}\right).$$

При  $\frac{a\tau}{S^2} > 0,06$  для пластины и  $\frac{a\tau}{R^2} > 0,08$  для цилиндра расчет выравнивания температур можно вести по следующим формулам: для пластины толщиной  $2S$

$$\frac{\Delta t}{\Delta t_n} = 1,03 \exp\left(-2,47 \frac{a\tau}{S^2}\right);$$

для цилиндра

$$\frac{\Delta t}{\Delta t_n} = 1,11 \exp\left(-5,76 \frac{a\tau}{R^2}\right);$$

для цилиндра радиусом  $R$  и высотой  $2H$

$$\frac{\Delta t}{\Delta t_n} = 1,14 \exp\left(-2,47 \frac{a\tau}{H^2} - 5,76 \frac{ax}{R^2}\right).$$

Необходимая температура печи  $t_{\text{п}}$  и тепловой поток  $q$  при выравнивании температур определяются из выражений:  
для пластины бесконечной длины и ширины

$$\frac{t_{\text{п}} - t_{\text{пов}}}{t_{\text{пов}} - t_{\text{н.ц}}} = \frac{\lambda}{\alpha S} F\left(\frac{a\tau}{S^2}\right); \quad q = \frac{\lambda \Delta t_{\text{н.т}}}{S} F\left(\frac{a\tau}{S^2}\right);$$

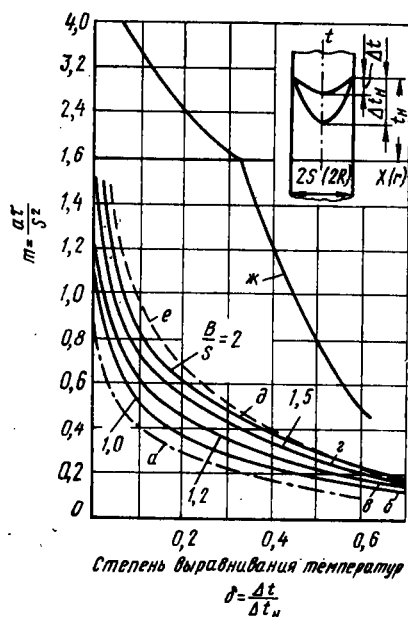


Рис. 166. График для определения продолжительности выдержки:  
а — цилиндр; б — призма ( $B$  и  $S$  — стороны призмы); в — пластина; ж — в топочной зоне методической печи

для цилиндра бесконечной длины

$$\frac{t_{\text{п}} - t_{\text{пов}}}{t_{\text{пов}} - t_{\text{н.ц}}} = \frac{\lambda}{\alpha R} F\left(\frac{a\tau}{R^2}\right);$$

$$q = \frac{\lambda \Delta t_{\text{н.т}}}{R} F\left(\frac{a\tau}{R^2}\right).$$

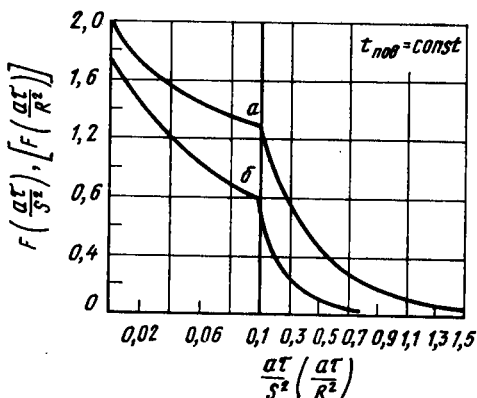


Рис. 167. Функция  $F$  для температур печи и теплового потока при постоянной температуре поверхности:  
а — пластина; б — цилиндр

Значения функций  $F$  приведены на рис. 167.

III случай. Мгновенное изменение температуры поверхности тела при параболическом распределении температур в начальный момент. Краевые условия:

$$t_{\tau=0} = F(x) = t_{\text{н.ц}} + \Delta t_{\text{н.т}} \frac{x^2}{S^2}; \quad t_{x=\pm S} = \varphi(\tau) = t_{\text{пов}};$$

где начальная разность температур в теле

$$\Delta t_{\text{н.т}} = t_{\text{пов. н}} - t_{\text{н.ц}}; \quad \Delta t_{\text{пов}} = t_{\text{пов}} - t_{\text{пов. н}}.$$

Текущая температура определяется из выражений:  
для пластины бесконечной длины и ширины

$$t = t_{\text{пов}} - \Delta t_{\text{пов}} \Phi\left(\frac{a\tau}{S^2}; \frac{x}{S}\right) - \Delta t_{\text{н.т}} \Phi_2\left(\frac{a\tau}{S^2}; \frac{x}{S}\right),$$

функция  $\Phi$  определяется по рис. 163, а, а функция  $\Phi_2$  — по рис. 165, а; для цилиндра бесконечной длины

$$t = t_{\text{пов}} - \Delta t_{\text{пов}} \Phi_1\left(\frac{a\tau}{R^2}; \frac{r}{R}\right) - \Delta t_{\text{н.т}} \Phi_3\left(\frac{a\tau}{R^2}; \frac{r}{R}\right),$$

функция  $\Phi_1$  определяется по рис. 163, б, а функция  $\Phi_3$  — по рис. 165, б.

## 6. Линейное изменение температуры поверхности тела

I случай. Линейное изменение температуры поверхности тела, т. е. нагрев тела при постоянной скорости  $C_H$  и равномерном распределении температур в начальный момент. Краевые условия запишутся:

$$t_x = \pm s = t_n + C_H \tau; \quad t_{\tau=0} = t_n = F(x).$$

Решение в общем виде имеет вид:

для пластины бесконечной длины и ширины

$$\frac{t - t_{\text{пов}}}{C_H \tau} = \Phi \left( \frac{a \tau}{S^2}; \frac{x}{S} \right),$$

$$\text{где } t_{\text{пов}} = t_n + C_H \tau;$$

для цилиндра бесконечной длины

$$\frac{t - t_{\text{пов}}}{C_H \tau} = \Phi \left( \frac{a \tau}{R^2}; \frac{r}{R} \right).$$

Функции  $\Phi$  в зависимости от критерия Фурье и безразмерных координат точек представлены на рис. 168 и 169.

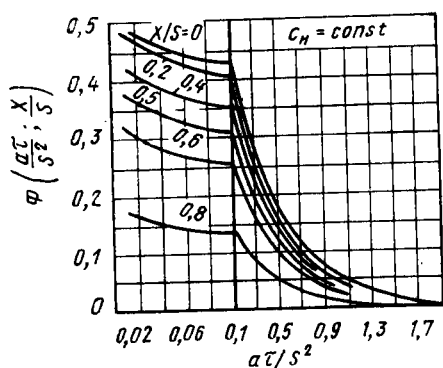


Рис. 168. Функции  $\Phi \left( \frac{a \tau}{S^2}; \frac{x}{S} \right)$  для пластины при линейном изменении температуры поверхности

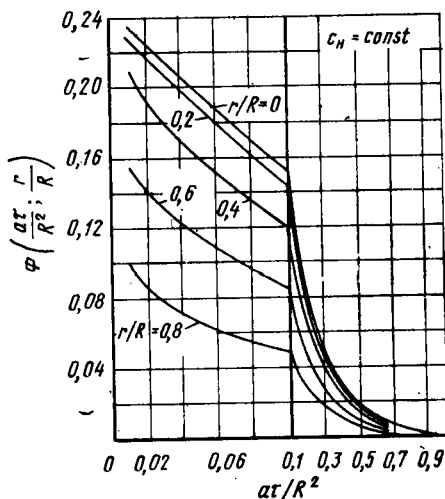


Рис. 169. Функции  $\Phi \left( \frac{a \tau}{R^2}; \frac{r}{R} \right)$  для цилиндра при линейном изменении температуры поверхности

При  $\frac{a \tau}{S^2} \gg 1$  для пластины бесконечной длины и ширины можно пользоваться следующими формулами:

$$t = t_n + C_H \tau + \frac{C_H S^2}{2a} \left( \frac{x^2}{S^2} - 1 \right);$$

$$t_{\text{ц}} = t_n + C_H \tau - \frac{C_H S^2}{2a};$$

$$\Delta t_{\text{max}} = \frac{C_H S^2}{2a}; \quad t = t_{\text{пов}} + \Delta t_{\text{max}} \left( \frac{x^2}{S^2} - 1 \right);$$

для цилиндра бесконечной длины при  $\frac{a \tau}{R^2} \gg 0,5$

$$t = t_n + C_H \tau + \frac{C_H R^2}{4a} \left( \frac{r^2}{R^2} - 1 \right); \quad t_{\text{ц}} = t_n + C_H \tau - \frac{C_H R^2}{4a};$$

$$\Delta t_{\text{max}} = \frac{C_H R^2}{4a}; \quad t = t_{\text{пов}} + \Delta t_{\text{max}} \left( \frac{r^2}{R^2} - 1 \right).$$

II случай. Линейное изменение температуры поверхности при параболическом распределении температур в начальный момент. Краевые условия:

$$t_{x=\pm S} = t_{\text{пов. н}} + C_n \tau; \quad t_{\tau=0} = t_{\text{ц. н}} + \Delta t_n \frac{x^2}{S^2}.$$

Формулы для определения параметров в процессе нагрева имеют следующий вид для тел различной формы:

$$t = t_{\text{пов. н}} + C_n \tau + k \frac{C_n S^2}{a} \left( \frac{x^2}{S^2} - 1 \right) + \frac{1}{k} \left( \frac{k C_n S^2}{a} - \Delta t_n \right) \Phi \left( \frac{a \tau}{S^2} \frac{x}{S} \right),$$

где  $k$  — коэффициент формы, значения которого приведены в табл. XIII-2; функцию  $\Phi$  берут по рис. 168 или 169 в зависимости от формы тела;

$t$  — температура в точке тела с координатой  $x$  или  $r$ ;

$$\Delta t = t_{\text{пов}} - t_{\text{ц}} = \Delta t_{\text{max}} - \frac{1}{k} (\Delta t_{\text{max}} - \Delta t_n) \Phi;$$

$$\Delta t_{\text{max}} = k C_n S^2 / a,$$

$\Phi$  берут по рис. 168 или 169 для  $x/S=0$  и  $r/R=0$ .

Тепловой поток

$$q = C_n S c \gamma (2k - \Phi) + \frac{1}{k} \Delta t_n \frac{\lambda}{S} \Phi,$$

где  $\Phi$  — функция, значения которой приведены на рис. 170.

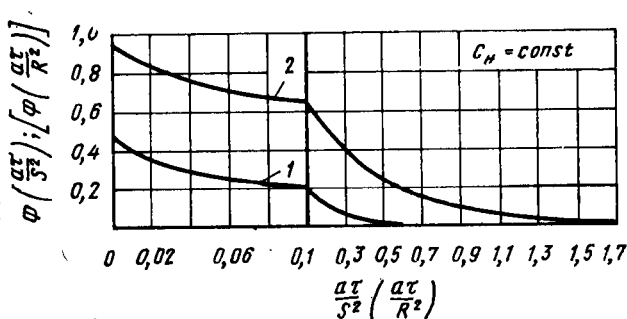


Рис. 170. Функции  $\Phi \left( \frac{a \tau}{S^2} \right)$  для температур печи и теплового потока при линейном изменении температуры поверхности:  
1 — цилиндра бесконечной длины;  
2 — пластины

При  $\tau > 2k \frac{S^2}{a}$  можно пользоваться формулами

$$t_{\text{ц}} = t_{\text{пов. н}} + C_n \tau - k \frac{C_n S^2}{a}; \quad \Delta t = k \frac{C_n S^2}{a};$$

$$q = 2k C_n S c \rho.$$

## Поверхностные условия II рода

Решение уравнения теплопроводности при поверхностных условиях второго рода, т. е. при заданном тепловом потоке, который принимается за постоянную величину  $q_{x=\pm S} = \text{const}$ ;  $t_{\tau=0} = 0$ , имеет следующий вид:

для пластины бесконечной длины и ширины

$$t = \frac{q S}{2 \lambda} \left[ \frac{2 a \tau}{S^2} + \left( \frac{x}{S} \right)^2 - \frac{1}{3} + \sum_{l=1}^{\infty} \frac{4 (-1)^{l+1}}{\varepsilon_l^2} \times \right. \\ \left. \times \cos \varepsilon_l \frac{x}{S} \exp \left( -\varepsilon_l^2 \frac{a \tau}{S^2} \right) \right],$$

где  $\varepsilon_l = \pi l$  ( $l=1, 2, 3, \dots$ ).

Это решение в общем виде запишется:

$$t \frac{2\lambda}{qS} = F\left(\frac{a\tau}{S^2}; \frac{x}{S}\right).$$

Значения функции  $F$  представлены на рис. 171.

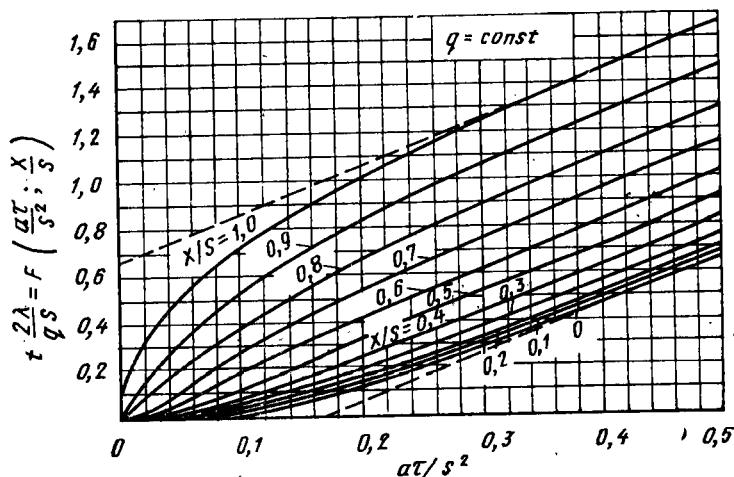
Для значений  $\frac{a\tau}{S^2} \geq 0,3$  формулы принимают вид:

$$t = \frac{qS}{2\lambda} \left[ \frac{2a\tau}{S^2} + \left(\frac{x}{S}\right)^2 - \frac{1}{3} \right]; \quad t_{\text{пов}} = \frac{qS}{2\lambda} \left( \frac{2a\tau}{S^2} + \frac{2}{3} \right);$$

$$t_{\text{ц}} = \frac{qS}{2\lambda} \left( \frac{2a\tau}{S^2} - \frac{1}{3} \right);$$

$$\Delta t = t_{\text{пов}} - t_{\text{ц}} = \frac{qS}{2\lambda}; \quad t_{\text{ср}} = t_{\text{пов}} - \frac{2}{3} \Delta t = t_{\text{ц}} + \frac{1}{3} \Delta t.$$

Рис. 171. Функции  $F\left(\frac{a\tau}{S^2}; \frac{x}{S}\right)$  для условия нагрева  $q = \text{const}$ .



Для последней точки начального участка

$$t'_{\text{пов}} = 1,27 \Delta t = 1,27 \frac{qS}{2\lambda}; \quad t'_{\text{ц}} = t'_{\text{пов}} - \frac{qS}{2\lambda} = 0,27 \Delta t.$$

Время нагрева

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{1}{2} \frac{S^2}{a \Delta t} \left( t'_{\text{пов}} - \frac{2}{3} \Delta t \right) = \frac{S\rho c}{q} \left( t'_{\text{пов}} - \frac{2}{3} \frac{qS}{2\lambda} \right) = \\ &= \frac{S\rho c t'_{\text{ср}}}{q} = \frac{S\rho \Delta t}{q}. \end{aligned}$$

Для цилиндра бесконечной длины при  $\frac{a\tau}{R^2} \geq 0,25$  расчетные формулы имеют вид:

$$t = \frac{qR}{2\lambda} \left[ \frac{4a\tau}{R^2} + \left(\frac{r}{R}\right)^2 - \frac{1}{2} \right]; \quad t_{\text{пов}} = \frac{qR}{2\lambda} \left( \frac{4a\tau}{R^2} + \frac{1}{2} \right);$$

$$t_{\text{ц}} = \frac{qR}{2\lambda} \left( \frac{4a\tau}{R^2} - \frac{1}{2} \right); \quad \Delta t = t_{\text{пов}} - t_{\text{ц}} = \frac{qR}{2\lambda};$$

$$t'_{\text{ср}} = t_{\text{ц}} + \frac{1}{2} \Delta t = t_{\text{пов}} - \frac{1}{2} \Delta t;$$

$$\tau = \frac{R\rho c}{2q} \left( t'_{\text{пов}} - \frac{1}{2} \frac{qR}{2\lambda} \right) = \frac{R\rho c}{2q} t'_{\text{ср}} = \frac{R\rho \Delta t}{2q}.$$

Для последней точки начального участка, т. е. при  $\tau' = 0,25 \frac{R^2}{a}$ ,

$$t'_{\text{пов}} = 1,5 \frac{qR}{2\lambda}; \quad t'_n = t'_{\text{пов}} - \frac{qR}{2\lambda} = 0,5 \frac{qR}{2\lambda}.$$

### Поверхностные условия III рода

#### Постоянная температура окружающей среды

Общее решение уравнения теплопроводности при граничных условиях III рода, т. е. при заданной температуре окружающей среды для пластины бесконечной длины и ширины толщиной  $2S$  при симметричном распределении температур в начальный момент, имеет следующий вид:

$$t = \varphi(\tau) + \frac{x}{S} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{\eta_l}{\eta_l + \sin \eta_l \cos \eta_l} \cos \eta_l \frac{x}{S} \exp \times \\ \times \left( -\eta_l^2 \frac{a\tau}{S^2} \right) \int_{-S}^{+S} [F(x) - \varphi(0)] \cos \eta_l \frac{x}{S} dx - \sum_{l=1}^{\infty} \frac{2 \sin \eta_l}{\eta_l + \sin \eta_l \cos \eta_l} \times \\ \times \cos \eta_l \frac{x}{S} \exp \left( -\eta_l^2 \frac{a\tau}{S^2} \right) \int_0^{\tau} \exp \left( \eta_l^2 \frac{a\tau}{S^2} \right) \varphi'(\tau) d\tau.$$

I случай. Для пластины, имеющей в начальный момент одинаковую температуру по всему сечению, и нагревающейся в печи с постоянной температурой, т. е. для краевых условий

$$t_{\tau=0} = t_n \quad \text{и} \quad \frac{\partial t}{\partial x_{x=\pm S}} = \pm h(t_n - t),$$

решение имеет вид:

$$t = t_n + (t_n - t_n) \sum_{l=1}^{\infty} \frac{2 \sin \eta_l}{\eta_l + \sin \eta_l \cos \eta_l} \cos \eta_l \frac{x}{S} \exp \left( -\eta_l^2 \frac{a\tau}{S^2} \right),$$

или в общем виде

$$\vartheta = \frac{t - t_n}{t_n - t_n} = F \left( \frac{a\tau}{S^2}; \frac{aS}{\lambda}; \frac{x}{S} \right).$$

Значения функций  $F$  в зависимости от критериев  $a\tau/S^2$  и  $aS/\lambda$  приведены на рис. 172—176 для различных значений симплекса  $x/S$ .

Для цилиндра бесконечной длины решение в общем виде

$$\frac{t - t_n}{t_n - t_n} = F \left( \frac{a\tau}{R^2}; \frac{aR}{\lambda}; \frac{r}{R} \right).$$

Значения функций  $F$  в зависимости от критериев  $a\tau/R^2$  и  $aR/\lambda$  приведены на рис. 179—183 для различных значений симплекса  $r/R$ .

Аналогичные графики для шара приведены на рис. 184 и 185.

Разность температур поверхности и середины пластины в общем виде

$$\frac{t_{\text{пов}} - t_n}{t_n - t_n} = \frac{\Delta t}{t_n - t_n} = F \left( \frac{a\tau}{S^2}; \frac{aS}{\lambda} \right)$$

представлена на рис. 186,а и для цилиндра бесконечной длины на рис. 186,б.

II случай. Нагрев в печи с постоянной температурой тела, имеющего перепад температур по сечению в начальный момент времени.

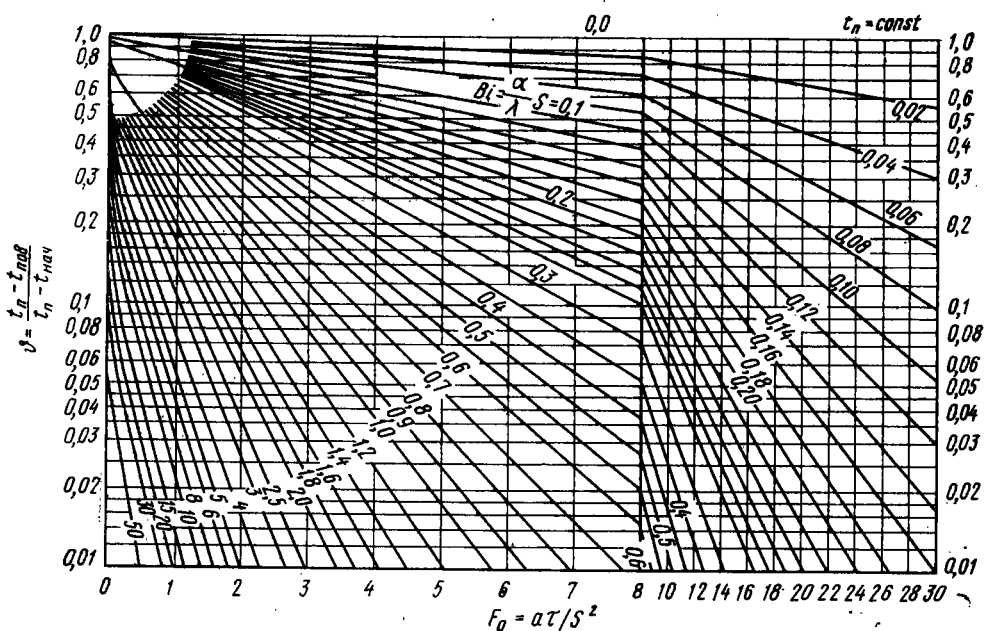


Рис. 172. Вспомогательный график для расчета нагрева или охлаждения поверхности пластины ( $x/S =$

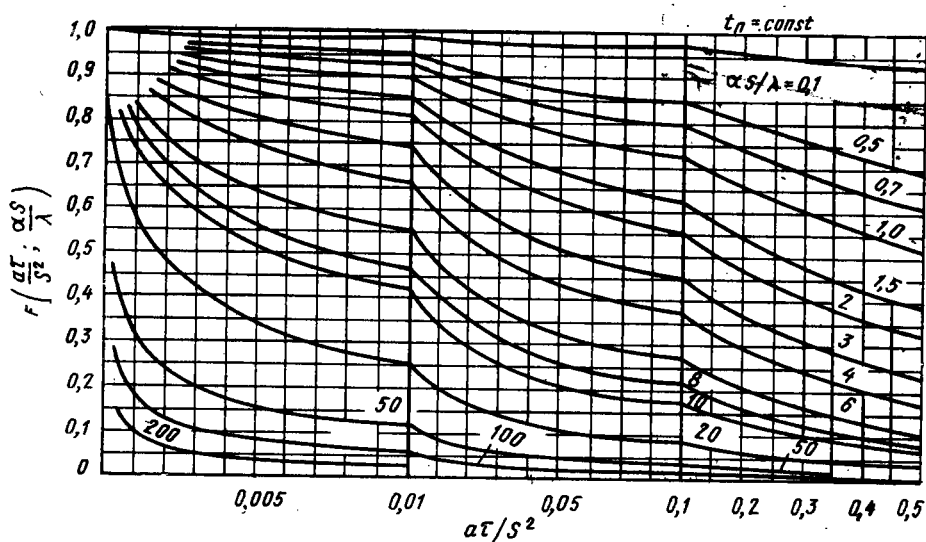


Рис. 173. Функции  $F\left(\frac{\alpha \tau}{S^2}; \frac{\alpha S}{\lambda}\right)$  для поверхности пластины при малых значениях  $Fo$

Краевые условия для этого случая запишутся:

$$t_{\tau=0} = t_{\text{ц.н}} + \Delta t_n \frac{x^2}{S^2};$$

$$\frac{\partial t}{\partial x_x = \pm S} = \pm h (t_n - t),$$

где

$$\Delta t_n = t_{\text{пов.н}} - t_{\text{ц.н}}; \quad h = \frac{\alpha}{\lambda}.$$

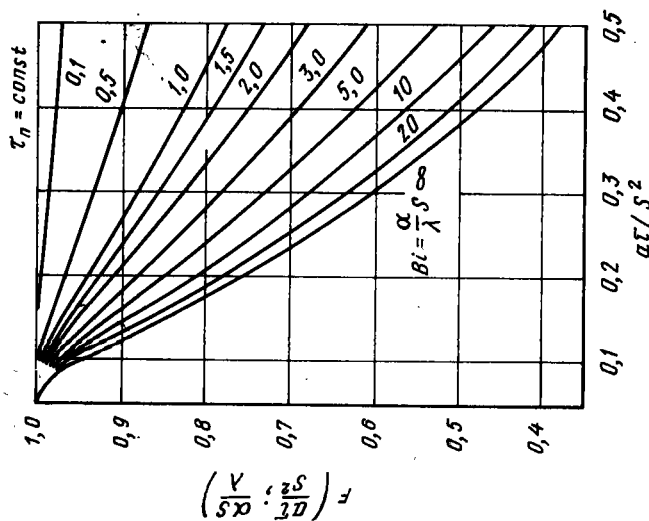


Рис. 175. Функции  $F\left(\frac{\alpha\tau}{\lambda S^2}, \frac{\alpha\tau}{\lambda S^2}\right)$  для середины пластины при малых значениях  $Bi$

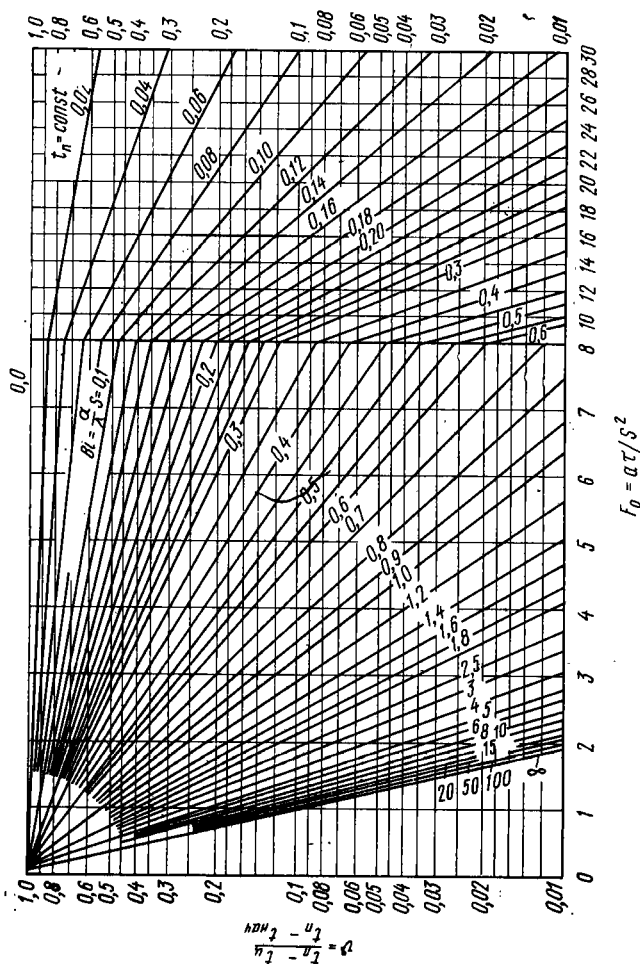


Рис. 174. Вспомогательный график для расчета нагрета или охлаждения средней плоскости пластины ( $x/S=0$ )

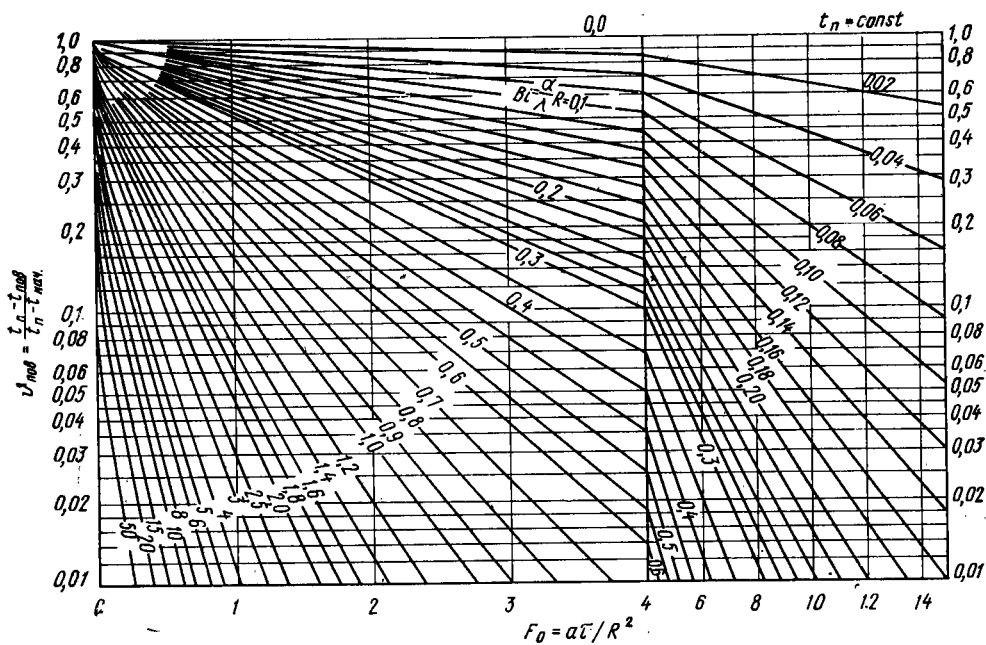


Рис. 176. Вспомогательный график для расчета нагрева или охлаждения поверхности цилиндра

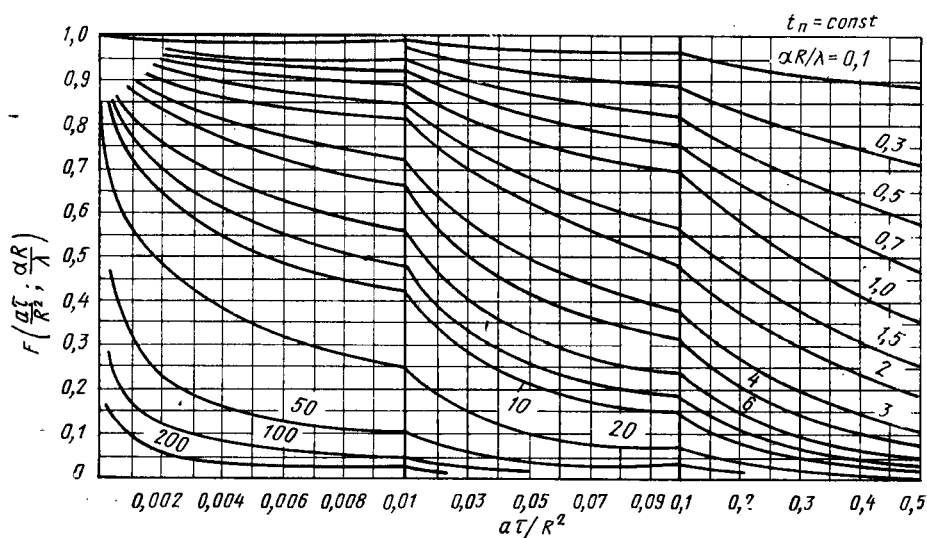


Рис. 177. Функции  $F\left(\frac{\alpha \tau}{R^2}; \frac{\alpha R}{\lambda}\right)$  для поверхности цилиндра при малых значениях  $Fo$

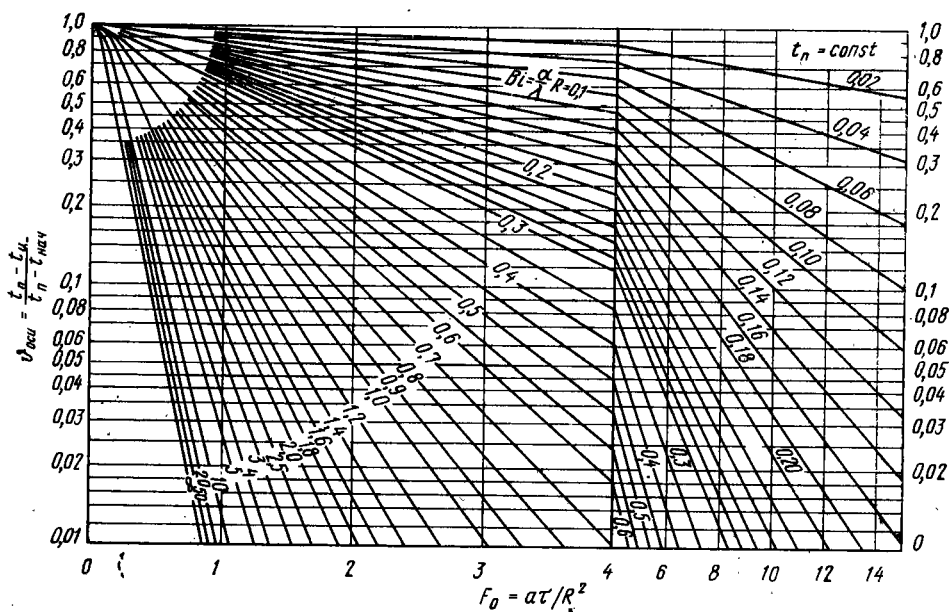


Рис. 178. Вспомогательный график для расчета нагрева или охлаждения оси цилиндра

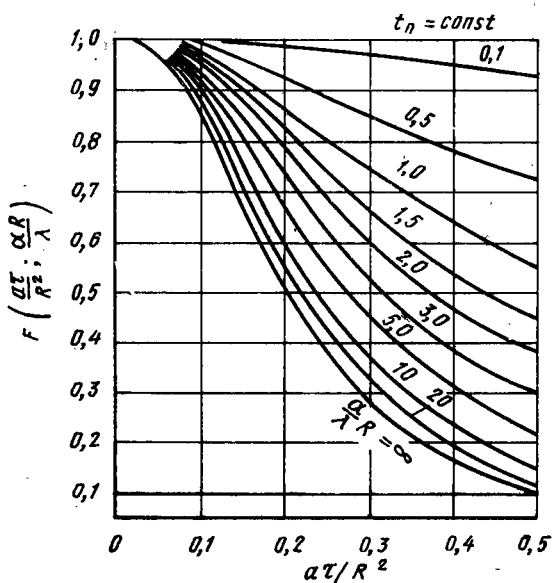


Рис. 179. Функция  $\left(\frac{\alpha \tau}{R^2}; \frac{\alpha R}{\lambda}\right)$  для середины цилиндра при малых значениях критерия Фурье

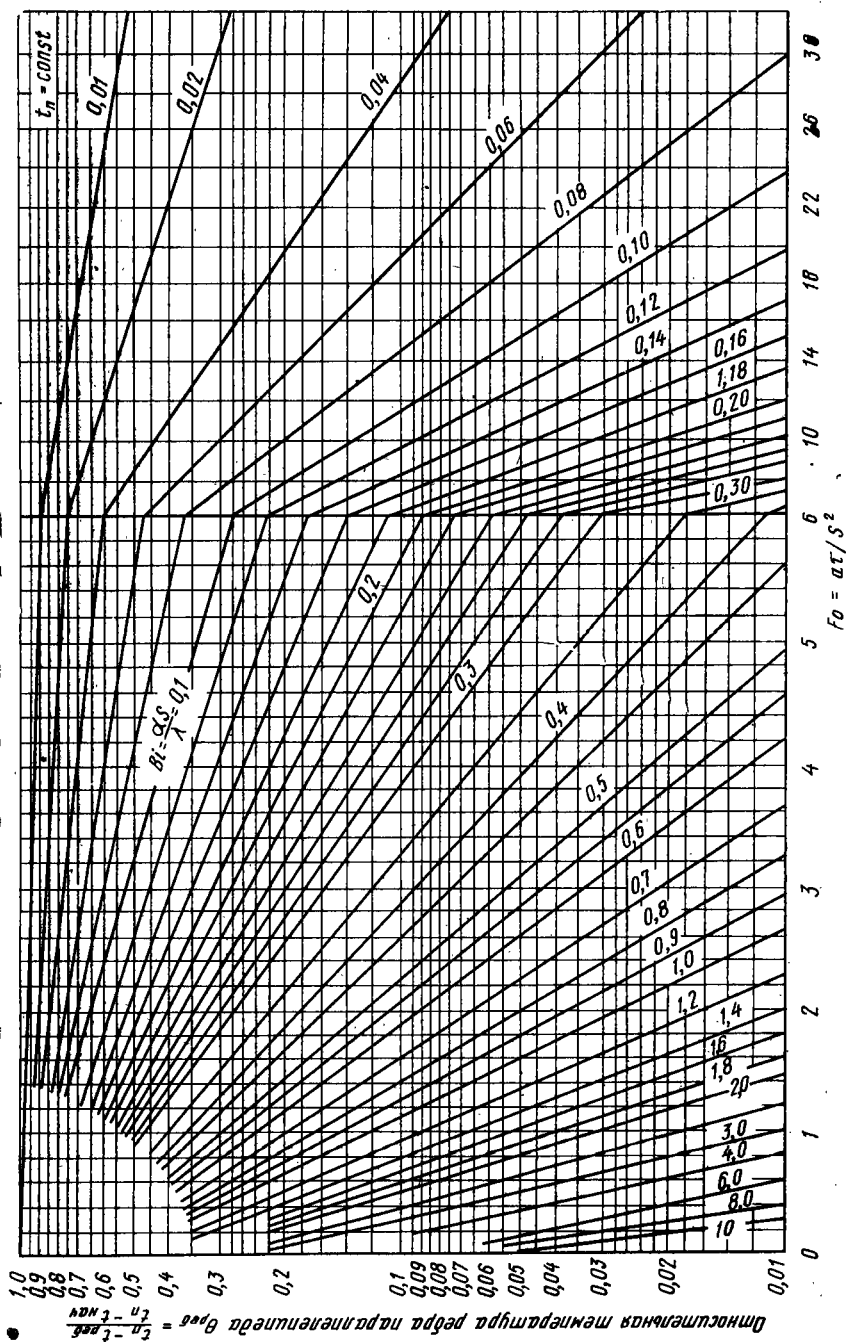


Рис. 180. Относительная температура для ребра неограниченного параллелепипеда квадратного сечения при  $Bi_{\text{усл}} = \text{const}$ ,  $Bi_{\text{усл}} = \text{const}$  и  $t_{\text{п}} = t_{\text{р}}(\tau) = \text{const}$ .

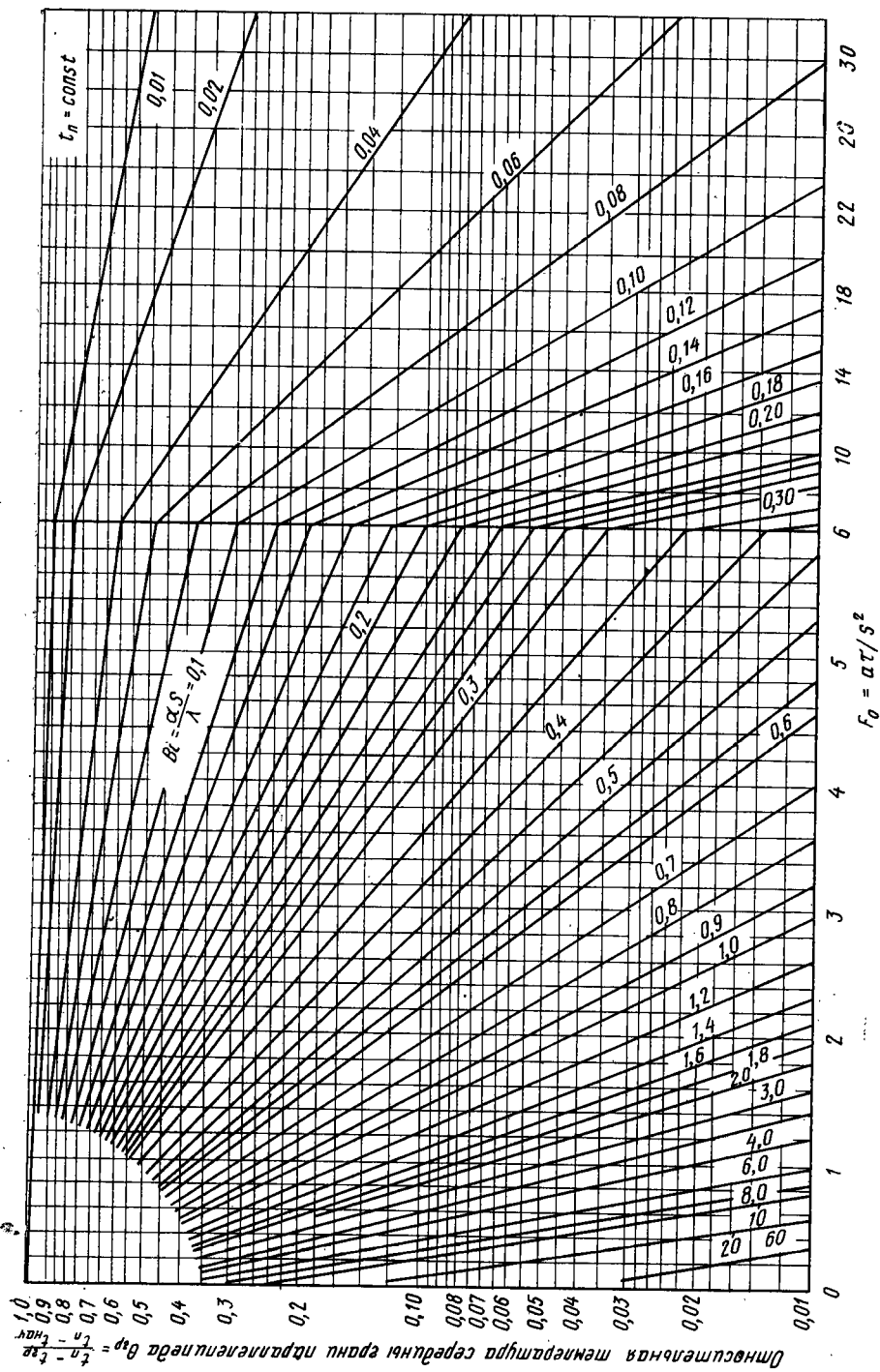


Рис. 181. Относительная температура середины грани неограниченного параллелепипеда квадратного сечения при  $Bi = \text{const}$ ,  $Bi_{\text{усл}} = \text{const}$  и  $t_{\text{н}} = t_{\text{р}}(\tau) = \text{const}$

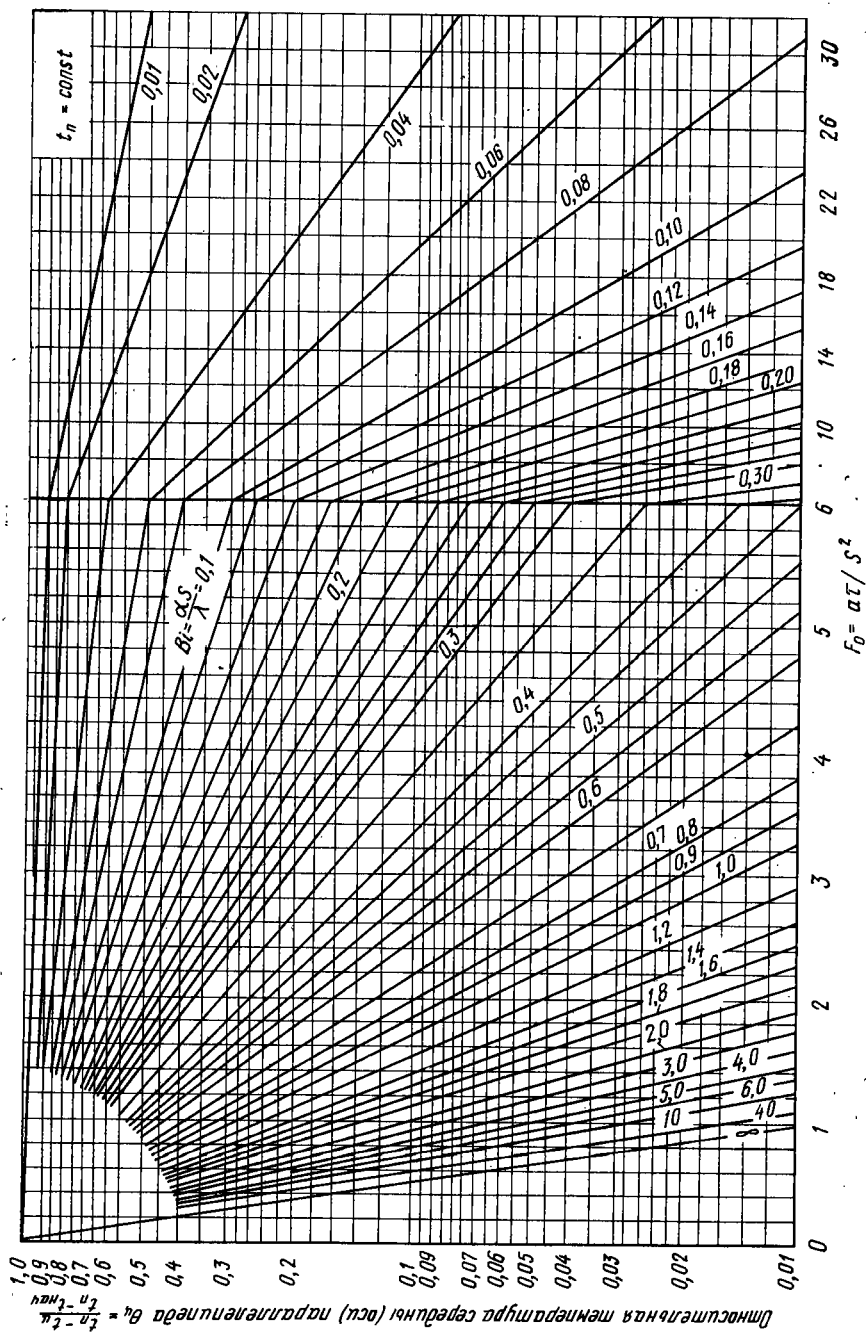


Рис. 182. Относительная температура середины (оси) неограниченного параллелепипеда квадратного сечения при  $Bi = \text{const}$  ( $Bi_{\text{уд}} = \text{const}$ ) и  $t_n = t_n(\tau) = \text{const}$

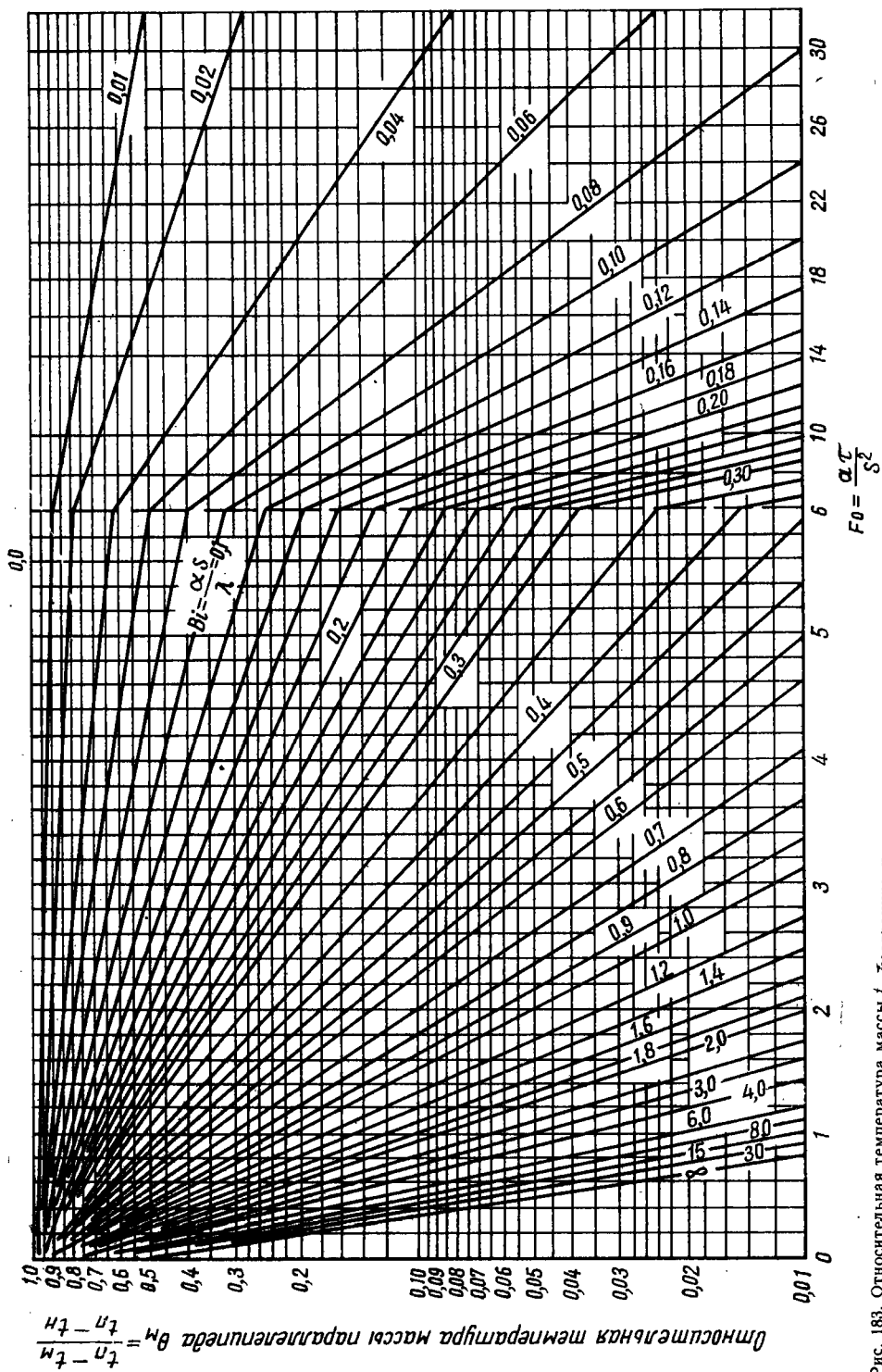


Рис. 183. Относительная температура массы  $t$  неограниченного параллельного квадратного сечения при  $Bi = \text{const}$ ,  $Bi_{\text{усл}} = \text{const}$  и  $t_{\text{п}} = t_{\text{г}}$  ( $\tau = \text{const}$ )

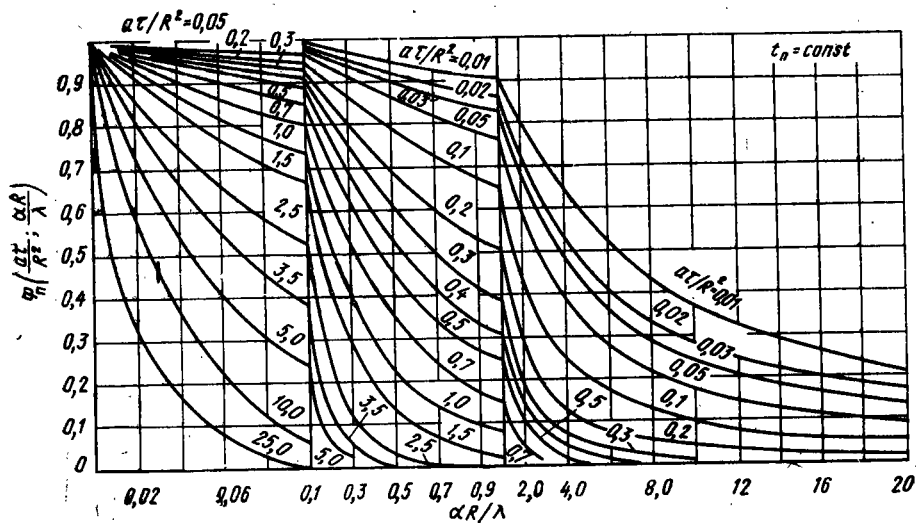


Рис. 184. Относительная температура поверхности шара

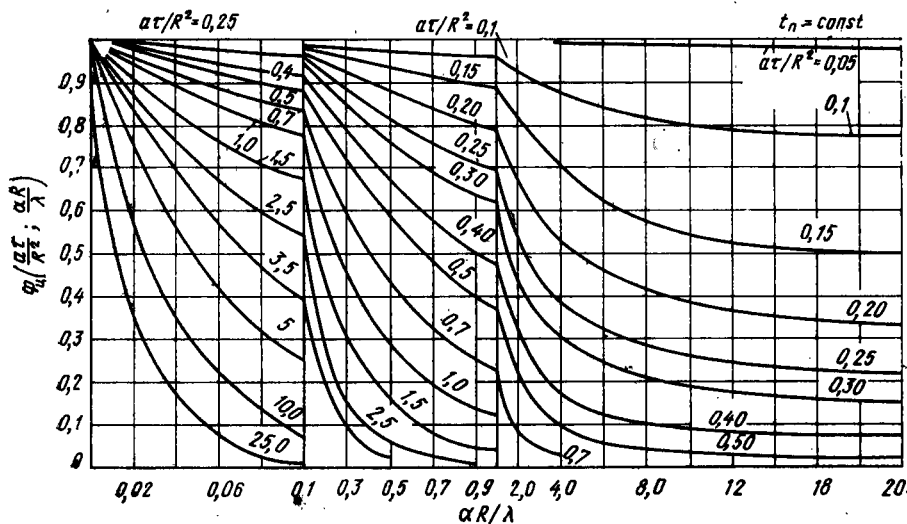


Рис. 185. Относительная температура центра шара

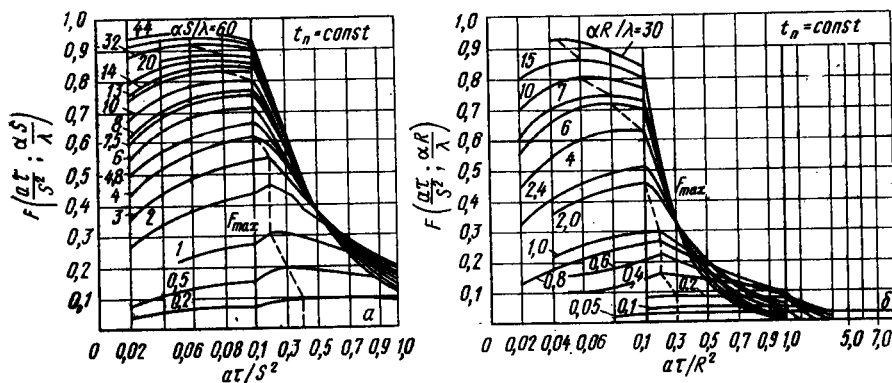


Рис. 186. Функции  $F \left( \frac{\alpha \tau}{S^2}; \frac{\alpha S}{\lambda} \right)$  для разности температур:

а — в пластине; б — в цилиндре

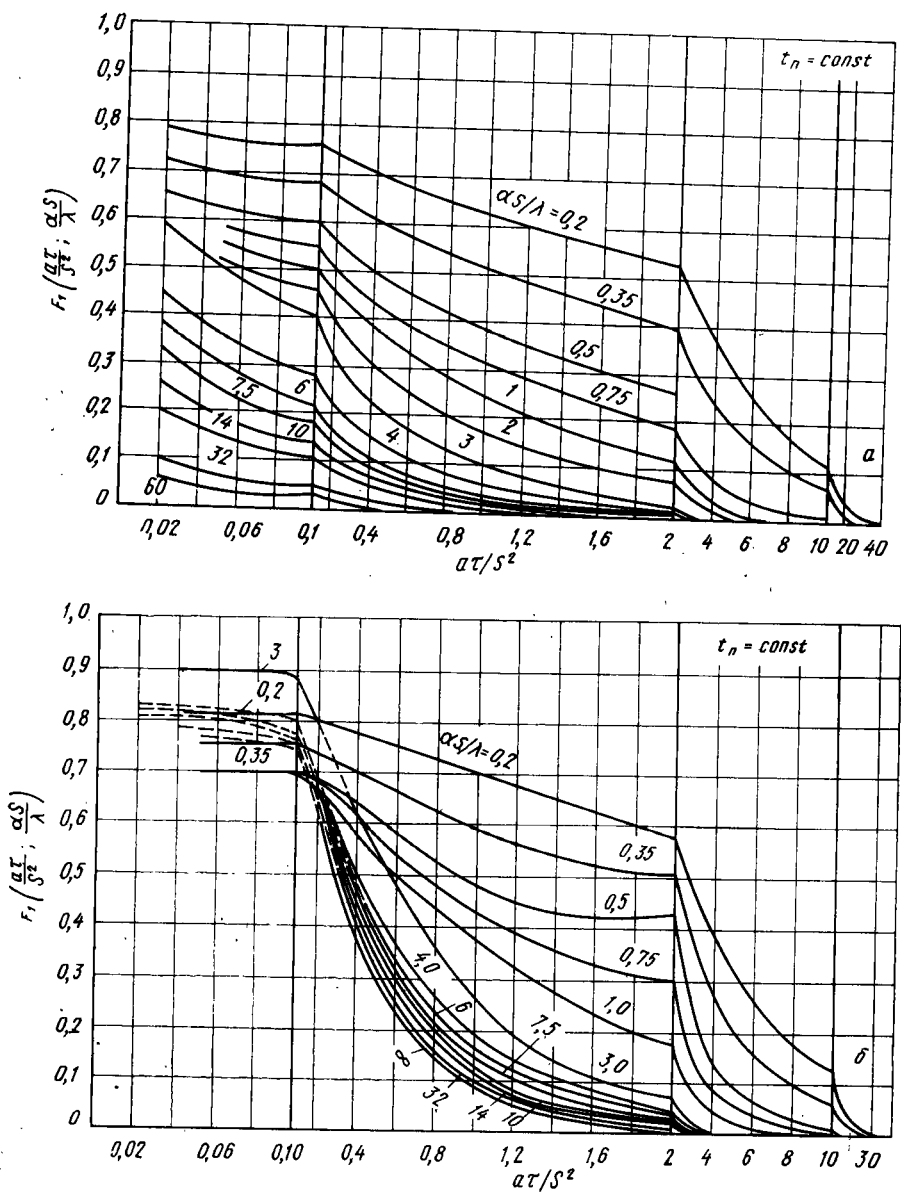


Рис. 187. Функции  $F_1\left(\frac{a\tau}{S^2}; \frac{\alpha S}{\lambda}\right)$  для пластины при различных значениях  $x/S$ :  
а—1; б—0

Решение в общем виде для пластины бесконечной длины и ширины имеет вид

$$t = t_n + (t_{\text{пов. н}} - t_n) F\left(\frac{a\tau}{S^2}; \frac{\alpha S}{\lambda}; \frac{x}{S}\right) - \Delta t_n F_1\left(\frac{a\tau}{S^2}; \frac{\alpha S}{\lambda}; \frac{x}{S}\right).$$

Значения функции  $F_1$  для  $\frac{x}{S} = 0$  и  $\frac{x}{S} = 1$  представлены на рис. 187, а, б, а значения функций  $F$  — на рис. 172—175.

Для цилиндра бесконечной длины можно пользоваться этим же выражением, заменив  $S$  на  $R$ , функции  $F_1$  находятся по рис. 188, а, б, а функции  $F$  по рис. 178—183.

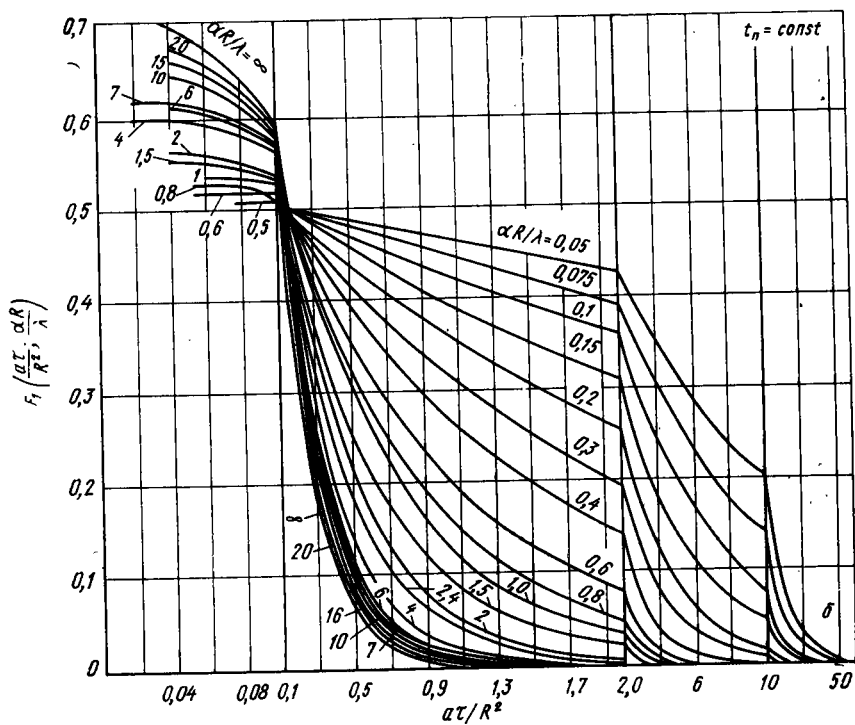
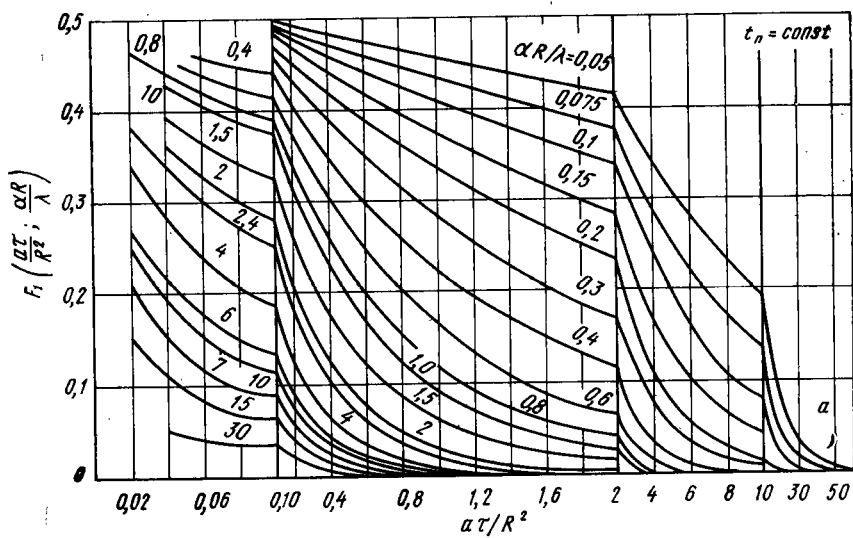


Рис. 188. Функции  $F_1\left(\frac{\alpha\tau}{R^2}, \frac{\alpha R}{\lambda}\right)$  для цилиндра при различных значениях  $r/R$ :

$a - 1$ ;  $b - 0$

При нагреве тел ограниченных размеров — призмы прямоугольного сечения, прямоугольного параллелепипеда, короткого цилиндра — значения температурного критерия получают, перемножив функции:

$$\frac{t - t_n}{t_{н.ср} - t_n} = F\left(\frac{a\tau}{S^2}; \frac{aS}{\lambda}; \frac{x}{S}\right) F\left(\frac{a\tau}{B^2}; \frac{aB}{\lambda}; \frac{y}{B}\right);$$

для параллелепипеда размерами  $2B \times 2S \times 2L$

$$\frac{t - t_n}{t_{н.ср} - t_n} = F\left(\frac{a\tau}{S^2}; \frac{aS}{\lambda}; \frac{x}{S}\right) F\left(\frac{a\tau}{B^2}; \frac{aB}{\lambda}; \frac{y}{B}\right) \times \\ \times F\left(\frac{a\tau}{L^2}; \frac{aL}{\lambda}; \frac{z}{L}\right);$$

для цилиндра с размерами  $2R \times 2L$

$$\frac{t - t_n}{t_{н.ср} - t_n} = F\left(\frac{a\tau}{R^2}; \frac{aR}{\lambda}; \frac{r}{R}\right) F\left(\frac{a\tau}{L^2}; \frac{aL}{\lambda}; \frac{z}{L}\right).$$

Значения функций  $F$  принимают из соответствующих графиков для одномерного поля, приведенных выше. При нахождении критериев подставляют  $B$  или  $L$  вместо  $S$  и  $y$  или  $z$  вместо  $x$ .

### Метод тепловой диаграммы

По методу тепловой диаграммы расчет процесса нагрева выполняют следующим образом: назначают температуру поверхности изделия, по которой определяют величины тепловых потоков в начале  $q_n$  и в конце  $q_k$  интервала. По крайним значениям теплового потока находят среднее значение за интервал нагрева как среднелогарифмическое:

$$q_{ср} = \frac{q_n - q_k}{2,3 \lg \frac{q_n}{q_k}} \text{ Вт/м}^2.$$

По величине теплового потока  $q_k$  находят перепад температур ( $^{\circ}\text{C}$ ) по сечению изделия:

$$\Delta t = \frac{q_k S}{2 \lambda}.$$

Приращение энтальпии изделия определяют по средним значениям температур по сечению тела:

$$\Delta i = i_k - i_n = c_0^{t_{ср.к}} t_{ср.к} - c_0^{t_{ср.н}} t_{ср.н} \text{ кДж/кг}.$$

Продолжительность интервала ( $\tau$ ) определяют по формуле

$$\tau = \frac{\Delta i S \rho}{k_1 q_{ср}}.$$

Коэффициент  $k_1$  определяют по табл. XIII-2 в зависимости от формы тела.

Расчет процесса нагрева ведут последовательно в несколько интервалов (не менее трех).

### Расчет по методу «тонких» изделий с поправкой на массивность

Расчет нагрева по методу «тонких» изделий с поправкой на массивность аналогичен ведению расчета по методу тепловой диаграммы.

Продолжительность нагрева определяется по формуле

$$\tau = \frac{S \rho c_{\text{ср}}}{k_1 \alpha} m \cdot 2,3 \lg \frac{t_{\text{п}} - t_{\text{ср.н}}}{t_{\text{п}} - t_{\text{ср.к}}} \text{ ч},$$

где  $m$  — коэффициент, учитывающий несовершенство теплопроводности массивных изделий,

$$m = 1 + \frac{(k_2 - 1) \alpha S}{k_2 k_3 \lambda} \quad \text{для } Bi \neq \infty.$$

Коэффициенты  $k_1$  даны в табл. XIII-2, а значения  $k_2, k_3$  — в табл. XIII-1.

### Метод регулярного режима при условии нагрева $t_{\text{п}} = \text{const}$

Нагрев при заданной температуре окружающей среды может производиться по формулам, которые пригодны для пластины при  $\frac{\alpha \tau}{S^2} \geq 0,3$  и для цилиндра при  $\frac{\alpha \tau}{R^2} \geq 0,25$ , когда наступает так называемый регулярный режим.

Таблица XIII-4

Коэффициенты для расчета нагрева или охлаждения пластины толщиной  $2S$

| Критерий<br>$Bi, \frac{\alpha}{\lambda} S$ | $\delta^2$ | $P$   | $M$   | $N$   | Критерий<br>$Bi, \frac{\alpha}{\lambda} S$ | $\delta^2$ | $P$    | $M$   | $N$   |
|--------------------------------------------|------------|-------|-------|-------|--------------------------------------------|------------|--------|-------|-------|
| 0,00                                       | 0,0000     | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 2,2                                        | 1,222      | 0,535  | 0,960 | 1,186 |
| 0,01                                       | 0,0100     | 0,997 | 1,000 | 1,002 | 2,4                                        | 1,277      | 0,510  | 0,956 | 1,193 |
| 0,02                                       | 0,0199     | 0,993 | 1,000 | 1,003 | 2,6                                        | 1,332      | 0,488  | 0,952 | 1,200 |
| 0,04                                       | 0,0397     | 0,987 | 1,000 | 1,006 | 2,8                                        | 1,380      | 0,468  | 0,948 | 1,205 |
| 0,06                                       | 0,0584     | 0,981 | 1,000 | 1,010 | 3,0                                        | 1,420      | 0,448  | 0,944 | 1,210 |
| 0,08                                       | 0,0778     | 0,974 | 1,000 | 1,013 | 3,5                                        | 1,52       | 0,406  | 0,935 | 1,221 |
| 0,10                                       | 0,0968     | 0,967 | 1,000 | 1,016 | 4,0                                        | 1,59       | 0,370  | 0,926 | 1,229 |
| 0,12                                       | 0,1154     | 0,960 | 1,000 | 1,020 | 4,5                                        | 1,66       | 0,338  | 0,919 | 1,235 |
| 0,14                                       | 0,1337     | 0,954 | 1,000 | 1,023 | 5,0                                        | 1,73       | 0,314  | 0,912 | 1,240 |
| 0,16                                       | 0,1518     | 0,948 | 1,000 | 1,026 | 5,5                                        | 1,78       | 0,293  | 0,906 | 1,244 |
| 0,18                                       | 0,1697     | 0,942 | 1,000 | 1,029 | 6,0                                        | 1,82       | 0,273  | 0,901 | 1,248 |
| 0,20                                       | 0,1874     | 0,936 | 1,000 | 1,031 | 7,0                                        | 1,90       | 0,241  | 0,892 | 1,254 |
| 0,22                                       | 0,2048     | 0,930 | 1,000 | 1,034 | 8,0                                        | 1,95       | 0,216  | 0,885 | 1,257 |
| 0,24                                       | 0,2220     | 0,924 | 0,999 | 1,037 | 9,0                                        | 2,00       | 0,196  | 0,879 | 1,260 |
| 0,26                                       | 0,2390     | 0,918 | 0,999 | 1,040 | 10                                         | 2,04       | 0,180  | 0,874 | 1,262 |
| 0,28                                       | 0,2558     | 0,912 | 0,999 | 1,042 | 12                                         | 2,08       | 0,152  | 0,866 | 1,265 |
| 0,30                                       | 0,2723     | 0,906 | 0,999 | 1,045 | 14                                         | 2,12       | 0,132  | 0,859 | 1,267 |
| 0,35                                       | 0,3125     | 0,891 | 0,998 | 1,052 | 16                                         | 2,16       | 0,116  | 0,855 | 1,268 |
| 0,40                                       | 0,3516     | 0,877 | 0,998 | 1,058 | 18                                         | 2,20       | 0,104  | 0,851 | 1,269 |
| 0,45                                       | 0,3894     | 0,863 | 0,997 | 1,064 | 20                                         | 2,24       | 0,094  | 0,847 | 1,270 |
| 0,50                                       | 0,4264     | 0,849 | 0,996 | 1,070 | 25                                         | 2,27       | 0,076  | 0,841 | 1,271 |
| 0,55                                       | 0,4624     | 0,836 | 0,995 | 1,076 | 30                                         | 2,30       | 0,065  | 0,836 | 1,271 |
| 0,60                                       | 0,497      | 0,823 | 0,994 | 1,081 | 35                                         | 2,33       | 0,0560 | 0,832 | 1,272 |
| 0,70                                       | 0,564      | 0,798 | 0,992 | 1,092 | 40                                         | 2,35       | 0,0500 | 0,829 | 1,272 |
| 0,80                                       | 0,626      | 0,774 | 0,990 | 1,102 | 50                                         | 2,37       | 0,0400 | 0,826 | 1,272 |
| 0,90                                       | 0,684      | 0,751 | 0,988 | 1,111 | 60                                         | 2,39       | 0,0333 | 0,824 | 1,273 |
| 1,00                                       | 0,740      | 0,729 | 0,986 | 1,119 | 70                                         | 2,40       | 0,0286 | 0,822 | 1,273 |
| 1,20                                       | 0,841      | 0,689 | 0,981 | 1,134 | 80                                         | 2,41       | 0,0250 | 0,820 | 1,273 |
| 1,40                                       | 0,931      | 0,653 | 0,977 | 1,148 | 90                                         | 2,41       | 0,0222 | 0,819 | 1,273 |
| 1,60                                       | 1,016      | 0,619 | 0,972 | 1,159 | 100                                        | 2,42       | 0,0200 | 0,818 | 1,273 |
| 1,80                                       | 1,090      | 0,587 | 0,968 | 1,169 | $\infty$                                   | 2,467      | 0,0000 | 0,810 | 1,272 |
| 2,00                                       | 1,162      | 0,559 | 0,964 | 1,179 |                                            |            |        |       |       |

Расчетные формулы для плиты толщиной  $2S$ :  
температура поверхности

$$t_{\text{пов}} = t_{\text{п}} - (t_{\text{п}} - t_{\text{н.ср}}) P \exp \left( -\delta^2 \frac{\alpha \tau}{S^2} \right);$$

температура оси

$$t_{\text{ц}} = t_{\text{п}} - (t_{\text{п}} - t_{\text{н.ср}}) N \exp \left( -\delta^2 \frac{\alpha \tau}{S^2} \right);$$

средняя температура по сечению

$$t_{\text{ср}} = t_{\text{п}} (t_{\text{п}} - t_{\text{н.ср}}) M \exp \left( -\delta^2 \frac{\alpha \tau}{S^2} \right).$$

Значения  $\delta^2$ ,  $P$ ,  $N$  и  $M$  приведены в табл. XIII-4 в зависимости от критерия  $\alpha S/\lambda$ . Для цилиндра диаметром  $2R$  расчетные формулы имеют аналогичный вид. Вместо  $S$  подставляется значение  $R$ , вместо  $\delta^2$ — $\mu^2$  и вместо  $P$ ,  $N$ ,  $M$ — $P_0$ ,  $N_0$ ,  $M_0$ . Значения этих величин приведены в табл. XIII-5.

Таблица XIII-5

Коэффициенты для расчета нагрева или охлаждения длинного цилиндра радиуса  $R$

| Критерий<br>$Bi, \frac{\alpha}{\lambda} R$ | $\mu^2$ | $P_0$ | $M_0$ | $N_0$ | Критерий<br>$Bi, \frac{\alpha}{\lambda} R$ | $\mu^2$ | $P_0$  | $M_0$ | $N_0$ |
|--------------------------------------------|---------|-------|-------|-------|--------------------------------------------|---------|--------|-------|-------|
| 0,00                                       | 0,0000  | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 2,2                                        | 2,70    | 0,584  | 0,949 | 1,357 |
| 0,01                                       | 0,0200  | 0,998 | 1,000 | 1,002 | 2,4                                        | 2,84    | 0,558  | 0,943 | 1,375 |
| 0,02                                       | 0,0398  | 0,995 | 1,000 | 1,005 | 2,6                                        | 2,97    | 0,534  | 0,937 | 1,392 |
| 0,04                                       | 0,0792  | 0,990 | 1,000 | 1,010 | 2,8                                        | 3,09    | 0,513  | 0,931 | 1,406 |
| 0,06                                       | 0,1183  | 0,985 | 1,000 | 1,014 | 3,0                                        | 3,20    | 0,492  | 0,925 | 1,420 |
| 0,08                                       | 0,1569  | 0,980 | 1,000 | 1,019 | 3,5                                        | 3,44    | 0,446  | 0,910 | 1,449 |
| 0,10                                       | 0,1951  | 0,975 | 1,000 | 1,024 | 4,0                                        | 3,64    | 0,407  | 0,896 | 1,472 |
| 0,12                                       | 0,2329  | 0,970 | 1,000 | 1,029 | 4,5                                        | 3,81    | 0,374  | 0,884 | 1,489 |
| 0,14                                       | 0,2704  | 0,965 | 1,000 | 1,034 | 5,0                                        | 3,96    | 0,345  | 0,873 | 1,504 |
| 0,16                                       | 0,3075  | 0,960 | 1,000 | 1,039 | 5,5                                        | 4,09    | 0,320  | 0,863 | 1,516 |
| 0,18                                       | 0,3443  | 0,956 | 1,000 | 1,044 | 6,0                                        | 4,20    | 0,229  | 0,854 | 1,527 |
| 0,20                                       | 0,3807  | 0,951 | 1,000 | 1,048 | 7,0                                        | 4,38    | 0,262  | 0,837 | 1,541 |
| 0,22                                       | 0,4167  | 0,946 | 0,999 | 1,053 | 8,0                                        | 4,53    | 0,234  | 0,823 | 1,551 |
| 0,24                                       | 0,4524  | 0,941 | 0,999 | 1,057 | 9,0                                        | 4,65    | 0,210  | 0,812 | 1,560 |
| 0,26                                       | 0,4877  | 0,937 | 0,999 | 1,062 | 10                                         | 4,75    | 0,191  | 0,803 | 1,566 |
| 0,28                                       | 0,5226  | 0,932 | 0,999 | 1,067 | 12                                         | 4,92    | 0,161  | 0,788 | 1,575 |
| 0,30                                       | 0,5572  | 0,927 | 0,999 | 1,071 | 14                                         | 5,03    | 0,137  | 0,776 | 1,581 |
| 0,35                                       | 0,642   | 0,915 | 0,998 | 1,082 | 16                                         | 5,12    | 0,120  | 0,768 | 1,585 |
| 0,40                                       | 0,726   | 0,903 | 0,998 | 1,093 | 18                                         | 5,18    | 0,106  | 0,761 | 1,588 |
| 0,45                                       | 0,806   | 0,891 | 0,997 | 1,103 | 20                                         | 5,24    | 0,095  | 0,755 | 1,590 |
| 0,50                                       | 0,888   | 0,880 | 0,996 | 1,114 | 25                                         | 5,34    | 0,076  | 0,744 | 1,595 |
| 0,55                                       | 0,962   | 0,869 | 0,995 | 1,124 | 30                                         | 5,41    | 0,065  | 0,736 | 1,598 |
| 0,60                                       | 1,036   | 0,858 | 0,993 | 1,134 | 35                                         | 5,46    | 0,0560 | 0,730 | 1,600 |
| 0,70                                       | 1,184   | 0,836 | 0,991 | 1,154 | 40                                         | 5,50    | 0,0500 | 0,725 | 1,602 |
| 0,80                                       | 1,322   | 0,815 | 0,989 | 1,172 | 50                                         | 5,55    | 0,0400 | 0,719 | 1,603 |
| 0,90                                       | 1,453   | 0,795 | 0,987 | 1,190 | 60                                         | 5,59    | 0,0333 | 0,714 | 1,604 |
| 1,00                                       | 1,580   | 0,774 | 0,985 | 1,208 | 70                                         | 5,62    | 0,0286 | 0,710 | 1,604 |
| 1,20                                       | 1,81    | 0,738 | 0,979 | 1,239 | 80                                         | 5,64    | 0,0250 | 0,707 | 1,605 |
| 1,40                                       | 2,03    | 0,704 | 0,973 | 1,268 | 90                                         | 5,66    | 0,0222 | 0,705 | 1,605 |
| 1,60                                       | 2,22    | 0,671 | 0,967 | 1,295 | 100                                        | 5,68    | 0,0200 | 0,704 | 1,606 |
| 1,80                                       | 2,39    | 0,639 | 0,961 | 1,319 | $\infty$                                   | 5,787   | 0,0000 | 0,691 | 1,606 |
| 2,00                                       | 2,55    | 0,610 | 0,955 | 1,340 |                                            |         |        |       |       |

При нагреве тел ограниченных размеров температуры получают, перемножив функции для одномерного поля. Формулы для призмы размерами  $2S \times 2B$  имеют следующий вид:

$$(x = S; y = B); \quad t_{S, B} = t_n - (t_n - t_{н.ср}) P_S P_B \exp(-\beta \alpha \tau);$$

температура поверхности на середине грани ( $x=0; y=B$ )

$$t_{0, B} = t_n - (t_n - t_{н.ср}) N_S P_B \exp(-\beta \alpha \tau);$$

температура поверхности на середине грани ( $x=S; y=0$ )

$$t_{S, 0} = t_n - (t_n - t_{н.ср}) N_B P_S \exp(-\beta \alpha \tau);$$

температура оси ( $x=0; y=0$ )

$$t_{0, 0} = t_n - (t_n - t_{н.ср}) N_S N_B \exp(-\beta \alpha \tau);$$

средняя температура призмы

$$t_{ср} = t_n - (t_n - t_{н.ср}) M_S M_B \exp(-\beta \alpha \tau);$$

средняя температура грани (2B)

$$t_{ср B} = t_n - (t_n - t_{н.ср}) P_S M_B \exp(-\beta \alpha \tau);$$

средняя температура грани (2S)

$$t_{ср S} = t_n - (t_n - t_{н.ср}) P_B M_S \exp(-\beta \alpha \tau);$$

Параметр  $\beta$  определяют по формуле

$$\beta = \frac{\delta_S^2}{S^2} + \frac{\delta_B^2}{B^2}.$$

Коэффициенты  $\delta_S^2$ ,  $P_S$ ,  $N_S$  и  $M_S$  определяют по табл. XIII-4 в зависимости от величины  $\alpha S/\lambda$ . Коэффициенты  $\delta_B^2$ ,  $P_B$ ,  $N_B$  и  $M_B$  находят из той же таблицы, но в зависимости от величины  $\alpha B/\lambda$ .

Аналогичный вид имеют формулы для параллелепипеда с размерами  $2S \times 2B \times 2L$  и цилиндра  $2R \times 2H$ .

## НАГРЕВ ГОРЯЧИХ СЛИТКОВ

Решение дифференциального уравнения теплопроводности для случая нагрева горячих слитков в критериальной форме имеет следующий вид:

для пластины

$$\frac{(t - t_{н.ц}) 2 \lambda}{q_0 S} = f \left( \frac{\alpha \tau}{S^2}; \quad \frac{x}{S}; \quad \frac{q_1}{q_0} \right);$$

для цилиндра

$$\frac{(t - t_{н.ц}) 2 \lambda}{q_0 R} = f \left( \frac{\alpha \tau}{R^2}; \quad \frac{r}{R}; \quad \frac{q_1}{q_0} \right),$$

где  $q_0$  — тепловой поток охлаждения слитка перед его посадкой в печь, Вт/м<sup>2</sup>, определяемый как сумма тепловых потоков излучением и конвекцией;

$q_1$  — тепловой поток при нагреве слитка в печи.

Графически эти зависимости представлены на рис. 189—192 для пластины и цилиндра для точек поверхности  $x/S$  или  $r/R=1$  и точек на оси слитка  $x/S$  или  $r/R=0$ .

Приведенные графики справедливы для условий нагрева слитка в печи при  $M_0 = \text{const}$ , т. е. при постоянной тепловой мощности колодцев.

либо для условий нагрева постоянным тепловым потоком  $q = \text{const}$  в области нерегулярного режима. Итак, необходимо, чтобы первый период нагрева был меньше  $\tau_1 < \tau'$ , т. е. меньше инерционного времени нагрева слитка:  $\tau' = R^2/Ka$ . Здесь  $K$  зависит от формы тела. Для плиты  $K=6$ ,

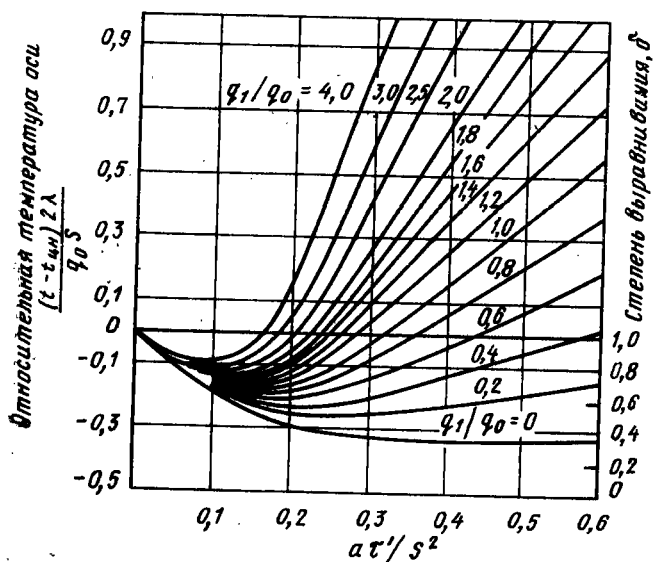


Рис. 189. График для определения температуры середины пластины при нагреве горячего посада

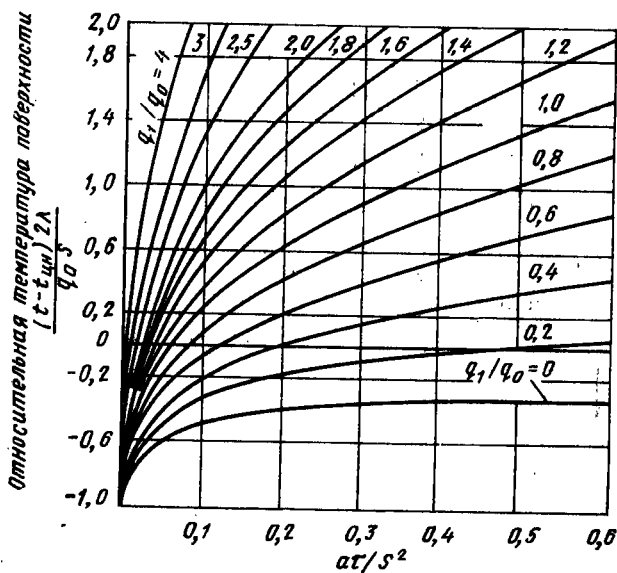


Рис. 190. График для определения температуры поверхности пластины при нагреве горячего посада

для цилиндра  $K=8$  и для шара  $K=10$ . Пригодность использования данной методики может быть также оценена по температуре на оси слитка  $t_{\text{пов}1}$  в конце первого периода нагрева при  $M_0 = \text{const}$ .

Должно быть

$$t_{\text{ц}1} = t_{\text{пов}1} - \frac{q_1 R}{2 \lambda} = t_{\text{пов}1} - \Delta t_1 < t_{\text{ср.н}},$$

т. е. меньше начальной средней температуры слитка.

Рис. 191. График для определения температуры оси цилиндра при нагреве горячего посада

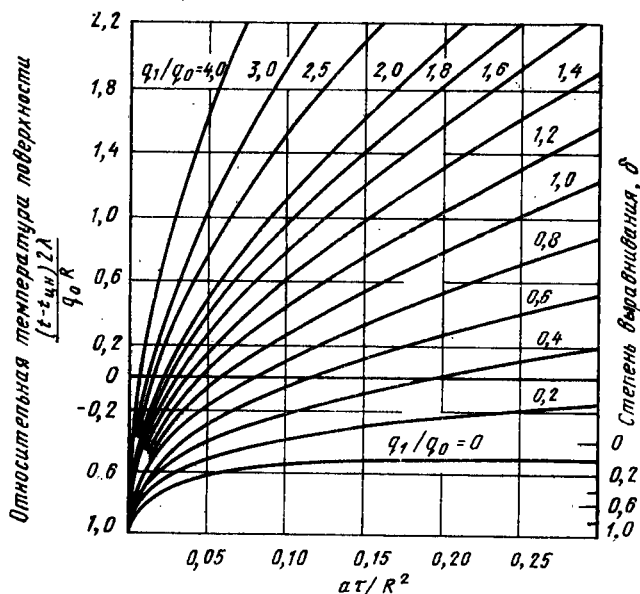
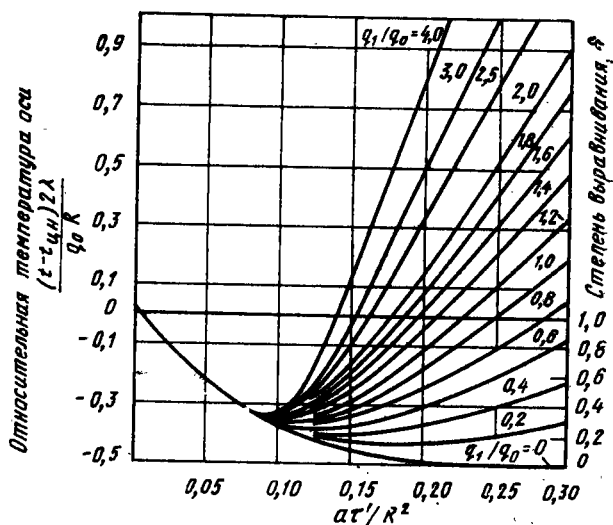


Рис. 192. График для определения температуры поверхности цилиндра при нагреве горячего посада

## НАГРЕВ НЕПОДВИЖНОГО СЛОЯ МАТЕРИАЛОВ

Нагрев неподвижного слоя кусковых материалов при фильтрации через него теплоносителя базируется на решениях Шумана и Анцелиуса, представленных на рис. 193—195. Решения выполнены для условия  $t_0 = \text{const}$ . Относительная температура слоя материалов  $\theta_m = \frac{t_m - t_{\text{нач}}}{t_0 - t_{\text{нач}}}$  или относительная температура газа  $\theta_r = \frac{t_r - t_{\text{нач}}}{t_0 - t_{\text{нач}}}$  на графиках представлены в зависимости от критерия высоты  $Y = \frac{k_0 h}{c_r w_0}$  и критерия времени  $Z = \frac{k_0 \tau}{c_m (1-f)}$ . В случае необходимости в критерии включаются переводные множители 3600 и 1000.

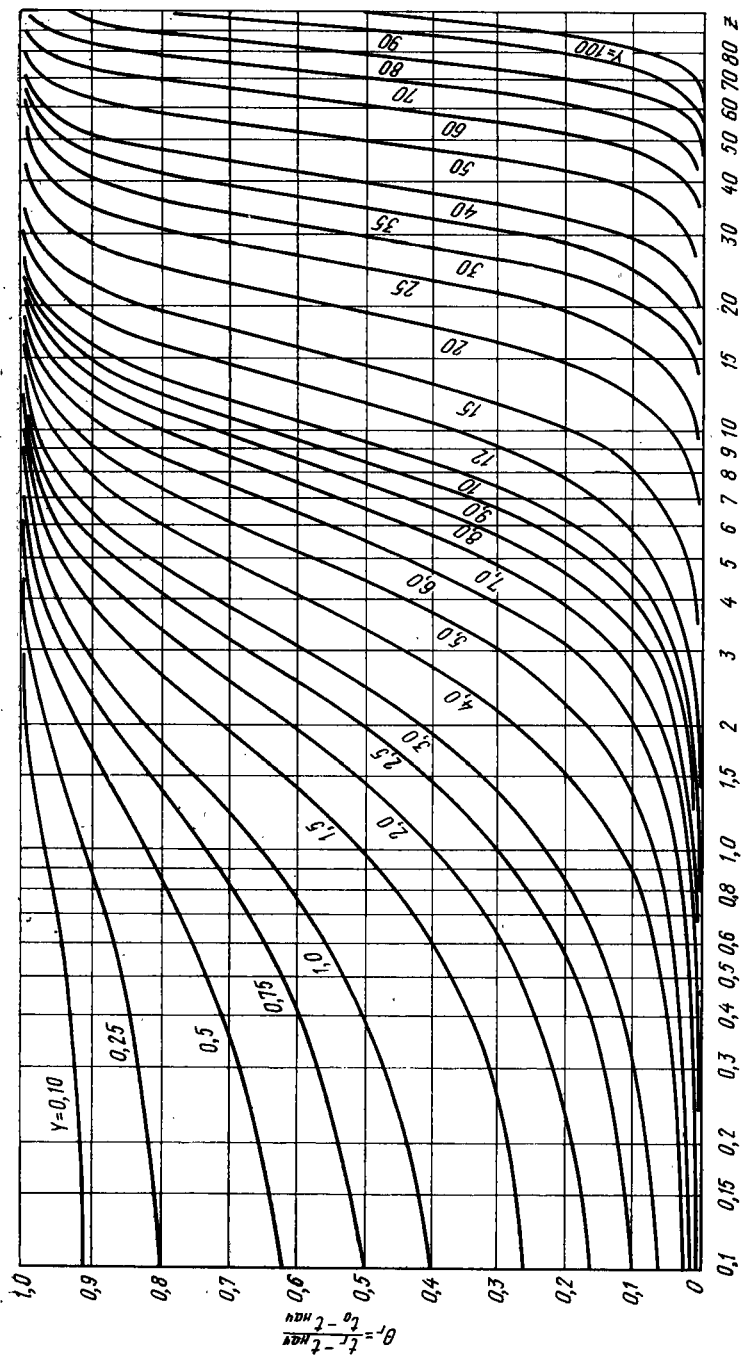


Рис. 193. График для определения температур газа в неподвижном слое

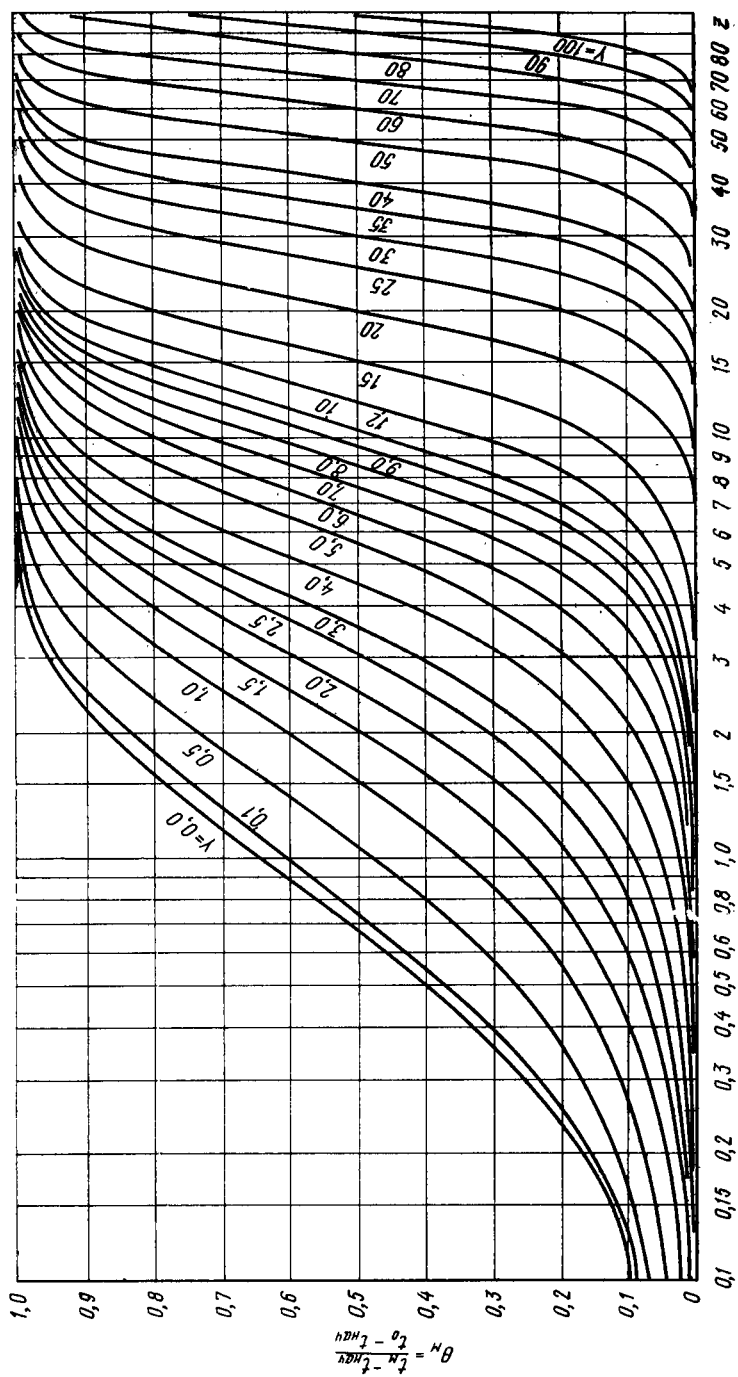


Рис. 194. График для определения температур материала в неподвижном слое

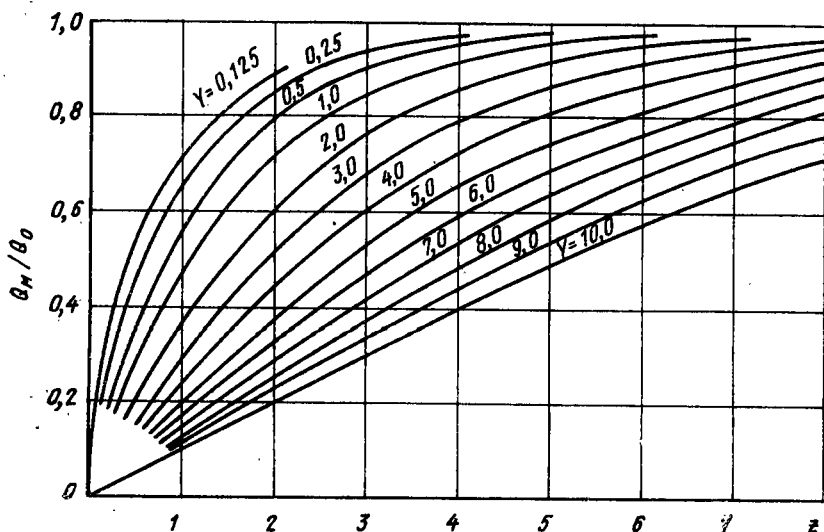


Рис. 195. График для определения относительной энтальпии материала слоя  $Q_m/Q_0$ .

Здесь  $t_m$  — температура массы материала слоя после тепловой обработки его газом, °C;

$t_0$  — температура газов на входе в слой (температура материала), °C;

$t_r$  — температура газов на выходе из слоя (температура материала), °C;

$t_{нач}$  — начальная температура материалов, °C;

$h$  — высота слоя, м;

$c_r$  — теплоемкость газа, кДж/(м³·°C); Дж/(м³·°C);

$w_0$  — скорость прохождения газового потока, отнесенная к свободному сечению шахты, м/с;

$f$  — порозность слоя; для доменных шихт и известняка  $f \approx 0,5$ ;

$\tau$  — время, ч (при необходимости использовать множитель 3600);

$c_m$  — объемная (кажущаяся) теплоемкость материала слоя с учетом тепла на сушку, обжиг и пр.; кДж/(м³·°C); Дж/(м³·°C);

$d$  — диаметр куска, м;

$\lambda$  — коэффициент теплопроводности куска, Вт/(м·°C);

$\alpha_v$  — объемный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м³·°C); кВт/(м³·°C);

$k_v$  — суммарный объемный коэффициент теплопередачи, учитывающий внутреннее тепловое сопротивление куска

$$\frac{1}{k_v} = \frac{1}{\alpha_v} + \frac{d^2}{72(1-f)\lambda} \text{ (м}^3 \cdot \text{°C)/Вт}.$$

Для действующих доменных печей

$$\alpha_v = 186 \frac{w^{0,9}}{d^{0,75}} T^{0,3} M';$$

для калиброванной шихты  $M' = 1$ ; при 20% мелочи  $M' = 0,5$ ;

для рядовой шихты и засыпки конусным аппаратом  $M' = 0,3$ .

Для слоя из шаров  $d=1,6\div 6,35$  мм при идеальном распределении газового потока

$$\alpha_v = 131 \frac{w}{d} T^{0,3}.$$

Для теплоотдачи между газом и пористой массой «пирога» агломерата

$$\alpha = 8,7 \cdot 10^4 w^{0,77}.$$

Для мелких натуральных засыпок (угольная мелочь, зерно и др.)

$$Nu = 0,23 Re^{0,863}.$$

Для получения изменения во времени температуры газа в месте его выхода из слоя задают значения  $\tau$  и определяют значения критерия времени  $Z$ . С помощью этих данных и критерия высоты  $Y$  по рис. 193 определяют значения симплекса  $\theta_r$  и  $t_r$ .

При необходимости нахождения значения температур материала во времени задают величину  $Z$  и, меняя критерий  $Y$ , определяют распределение температур по высоте слоя в рассматриваемый момент времени, используя график, представленный на рис. 194.

Количество тепла, аккумулированное слоем материала  $Q_m$  от начала его прогрева (отданное им при охлаждении), определяют по рис. 195 в зависимости от критериев  $Y$  и  $Z$ . Эти данные представлены в виде отношения  $Q_m/Q_0$ . Здесь  $Q_0 = P_m C_m t_0$  — максимальная энтальпия материала слоя. Величина  $Q_m = hF(1-f) C_m t_m$  позволяет также определить температуру материала  $t_m$ .

#### НАГРЕВ ЗАГотовок НА МОНОЛИТНОМ ПОДУ МЕТОДИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

В методических печах при переходе нагреваемого металла с глиссажных труб на монолитный под происходит изменение краевых условий нагрева.

На монолитном поду сварочной зоны начальные условия

$$t = t_{\text{пов}} - \Delta t \left[ 2 \frac{x}{S} - \left( \frac{x}{S} \right)^2 \right]$$

и поверхностные условия

$$\frac{\partial t}{\partial x_{x=2S}} = h (t_{\text{п}} - t).$$

Решение дифференциального уравнения в этом случае имеет вид

$$\frac{t - t_{\text{п}}}{t_{\text{н}} - t_{\text{п}}} = f \left( \frac{a \tau}{S^2}; \frac{\alpha S}{\lambda} \right).$$

Графически это решение представлено на рис. 196, по которому можно определить температуру верхней и нижней поверхности металла при переходе на монолитный под по известному времени нагрева металла на монолитном поду сварочной зоны.

При нагреве металла в топочной зоне многозонных методических печей возможны два варианта:

1) нагрев при поверхностных условиях для  $x=2S$ ,  $t_{\text{пов}}=\text{const}$  и начальных условиях

$$t = t_{\text{п}} - \Delta t \left[ 2 \frac{x}{S} - \left( \frac{x}{S} \right)^2 \right].$$

Для этого случая решение в виде

$$\frac{\Delta t}{\Delta t_{\text{н}}} = \delta = f\left(\frac{\alpha \tau}{S^2}\right)$$

графически представлено на рис. 166 для  $x=2S$ ;

2) нагрев в томильной зоне методической печи при  $t_{\text{п}} = \text{const}$  может быть рассчитан по уравнению

$$\frac{t_{\text{п.т}} - t_{\text{пов.к}}}{t_{\text{п.т}} - t_{\text{пов.н}}} = \Phi_1 + \Phi_2 \frac{t_{\text{п.с}} - t_{\text{пов.к}}}{t_{\text{п.т}} - t_{\text{пов.к}}},$$

где  $t_{\text{п.с}}$  — температура печи в сварочной зоне;

$t_{\text{пов.н}}$  и  $t_{\text{пов.к}}$  — температуры поверхности металла в начале и конце томильной зоны.

Функции  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  представлены на рис. 197.

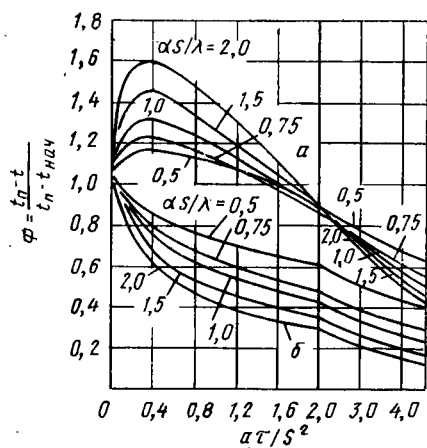


Рис. 196. График для расчета нагрева металла на монолитном поду сварочной зоны методических печей:

$a$  — нижняя поверхность;  $b$  — верхняя поверхность

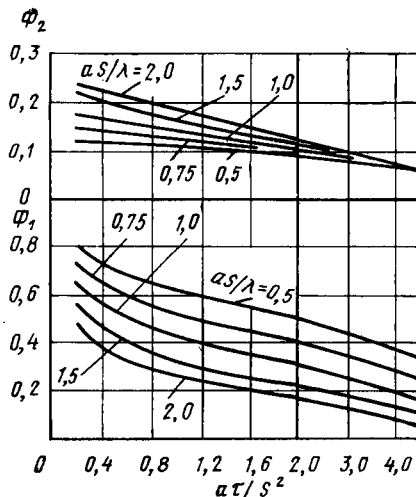


Рис. 197. Выдержка металла на монолитном поду томильной зоны методических печей при  $t_{\text{п}} = \text{const}$

## ТЕХНОЛОГИЯ НАГРЕВА СТАЛИ

При выполнении теплотехнических расчетов динамики нагрева изделий необходимо знать конечное распределение температур в теле, которое характеризуют конечной температурой поверхности  $t_{\text{п.к}}$  и конечной разностью температур между наиболее высокой и наиболее низкой температурами в теле:

$$\Delta t_{\text{к}} = t_{\text{пов.к}} - t_{\text{ц.к.}}$$

Конечная температура нагрева изделия выбирается в зависимости от технологических условий и дальнейших технологических процессов, для совершения или выполнения которых производится процесс нагрева.

При плавлении изделий конечная температура выбирается выше температуры ликвидуса для сплавов или точки плавления для чистых металлов. Величина перегрева зависит от конкретных условий; так, например, для различных марок сталей она составляет  $100 \div 200^\circ\text{C}$ .

Конечная температура стали при нагреве под прокатку выбирается на  $100 \div 150^\circ\text{C}$  ниже температуры солидуса, вблизи которой

происходят явления пережога. Теоретическая температура пережога и максимальная температура нагрева приведены в табл. XIII-6 для некоторых марок сталей.

Таблица XIII-6

Теоретическая температура пережога и максимальная температура нагрева

| Сталь                          | Максимальная температура нагрева, °С | Температура пережога, °С | Сталь                                | Максимальная температура нагрева, °С | Температура пережога, °С |
|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|
| Углеродистая, содержащая С, %: |                                      |                          | Кремнемарганцевая пружинная          | 1250                                 | 1350                     |
| 1,5 . . . . .                  | 1050                                 | 1140                     | Хромованадиевая . . . . .            | 1250                                 | 1350                     |
| 1,1 . . . . .                  | 1080                                 | 1180                     | Быстрорежущая . . . . .              | 1280                                 | 1380                     |
| 0,9 . . . . .                  | 1120                                 | 1220                     | Аустенитная хромоникелевая . . . . . | 1300                                 | 1420                     |
| 0,7 . . . . .                  | 1180                                 | 1280                     |                                      |                                      |                          |
| 0,5 . . . . .                  | 1250                                 | 1350                     |                                      |                                      |                          |
| 0,2 . . . . .                  | 1320                                 | 1470                     |                                      |                                      |                          |
| 0,1 . . . . .                  | 1350                                 | 1490                     |                                      |                                      |                          |

Эти величины могут быть также определены по рис. 198 или по диаграмме Fe—Fe<sub>3</sub>C (см. рис. 16, а также табл. XIII-7).

Таблица XIII-7

Температура нагрева углеродистых и легированных сталей (по заводским данным)

| Группа | Стали                                                                                                                                              | Температура нагрева слитков, °С |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| I      | 10—30 Т                                                                                                                                            | 1200—1220                       |
| II     | 40—55, 41А—50А, СК, 15Г—65Г, 65ГП, 48—БВ, С45, 15Х—33Х, 30Г2—50Г2, 15ХФ, 20ХФ<br>35Х—45Х, 38ХА, 30ХМА, 50ХГ, 50ХГА, 50ХГС                          | 1180—1200                       |
| III    | ШХ6—15, 0Х6—15, ЭИ325, У5—У9, У7А—У9А, Х, 9Х, Х09, 7Х3, 8Х3, 4ХС, 9ХС, В1, В2, 7Х, 4ХВС—6ХВС, ХВГ, 5ХВГ, 9ХВГ, 8СВМ, Ф, 8ХФ, 50ХФ, ЕХ2, ЕХ3, ЭИ241 | 1150—1170                       |
| IV     | У10—У13, У10А—У13А, Х12, Х12М, Х12К, ХГ, У12Г, ХВ5, Х05                                                                                            | 1100—1120                       |
| V      | 55С2, 60С2, 60С2А, 70С3А, 58СН2А, ЭИ142, ЭИ239                                                                                                     | 1180—1200                       |
| VI     | 13Н2А, 12ХН2А, 12ХН3А, 13ХН4А<br>20ХН3А, 20ХН—45ХН, 12Х2Н4А, Э8, 30ХН3                                                                             | 1180—1200                       |
| VII    | 33ХСМА, 18ХГМ, 33ХСА, 38ХСА, 35ХГСА, 40СХ, 25Н3, 37ХН3А, 38ХН3А, Э12, 25ХН4, 40ХНМА, 45ХНМФА, Х3НМ1—3, 45ХМФА, ЭИ274, ЭИ275, ЭИ320, 12Х2Н3МА       | 1180—1200                       |

| Группа | Стали                                                                                    | Температура нагрева слитков, °С |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| VIII   | 13ХНВА, Э14, 18ХНВА, 4ХНМ, 5ХНМ, 6ХНМ, 5ХГМ, ХНМ, 5315, 12Х5МА, ЭИ14, СХВ, ЭИ107, 38ХМЮА | 1180—1200                       |
| IX     | Н42, ЭИ318, ЭИ341, ЭИ292, ЭИ340, ЭИ181, ЭИ60, фу-родит                                   | 1200—1220                       |
| X      | ЭИ160, ЭИ161, Ж1—4, 18Х14А, 18Х15А, Я2, ЯИТ, Я1Т, 3ХВ8                                   | 1170—1190                       |
| XI     | Г, Ст0—4                                                                                 | 1240—1260                       |
| XII    | 1085, У5—У9, У7А—У9А                                                                     | 1120—1150                       |

На основании своих экспериментов Е. И. Казанцев рекомендует формулу для определения температуры перегрева доэвтектоидных углеродистых сталей:  $t_{\text{пер}} = 1320 + 8,35 [C] + 250 [C]^2$  °С, где [С] — содержание углерода в стали, %.

Эта температура может выбираться в качестве предельной при назначении температуры нагрева металла перед обработкой давлением.

При выборе конечной температуры нагрева необходимо иметь в виду, что температура не одинакова по всей поверхности и особенно велика при нагреве на ребрах и углах изделия. В зависимости от температуры источника тепла и его расположения по отношению к изделию эта разность температур может достигать 100÷200°С и более. Температуры начала и конца прокатки приведены для легированных сталей в табл. XIII-8 иковки различных сталей — в табл. XIII-9.

Таблица XIII-8  
Температура прокатки

| Стали                                                        | Температура, прокатки, °С |               |           |         |         |
|--------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------|-----------|---------|---------|
|                                                              | слитков                   |               | заготовок |         |         |
|                                                              | начало                    | конец не ниже | начало    | конец   |         |
|                                                              |                           |               |           | не выше | не ниже |
| Высококачественная нелегированная инструментальная . . . . . | 1100—1050                 | 750           | 1050—1000 | 850     | 750     |
| Качественная нелегированная инструментальная . . . . .       | 1100—1050                 | 750           | 1050—1000 | 850     | 750     |
| Легированная инструментальная:                               |                           |               |           |         |         |
| типа ХГ, Х, 9Х, 9ХС, В1, В2, ХВГ, Ф . . . . .                | 1100—1050                 | 850           | 1050—1000 | 850     | 750     |
| типа 4ХС, 7Х, 7Х3, 5ХВС, 4ХНВ, 5ХНМ . . . . .                | 1150—1100                 | 850           | 1130—1080 | 850     | 750     |
| типа Х12, Х12М, ХВ5 . . . . .                                | 1050—1000                 | 800           | 1020—980  | —       | 750     |
| Быстрорежущая и хромовольфрамовая 3ХВ8 . . . . .             | 1200—1150                 | 900           | 1180—1130 | —       | 900     |
| Шариковая и шарикоподшипниковая . . . . .                    | 1150—1100                 | 850           | 1080—1030 | 850     | 750     |
| Магнитная . . . . .                                          | 1180—1150                 | 850           | 1160—1100 | 850     | 750     |
| Пружинная для рессор . . . . .                               | 1130—1080                 | 900           | 1100—1050 | —       | 850     |
| Динамная и трансформаторная . . . . .                        | 1250—1200                 | 1000          | 1220—1180 | —       | 750     |
| Нержавеющая мартеиситная . . . . .                           | 1180—1130                 | 900           | 1180—1130 | —       | 900     |
| Нержавеющая аустенитная . . . . .                            | 1180—1130                 | 900           | 1180—1130 | —       | 900     |
| Жароупорная и силхромовая . . . . .                          | 1200—1160                 | 900           | 1180—1140 | —       | 850     |
| Марганцовистая (12% Мп) . . . . .                            | 1120—1070                 | 950           | 1100      | —       | 900     |
| Сталь с особыми физическими свойствами . . . . .             | 1120—1080                 | 900           | 1100—1060 | —       | 850     |
| Нихромовая . . . . .                                         | 1100—1050                 | 950           | 1100—1050 | —       | 950     |

Таблица XIII-9

Температура начала и концаковки различных сортов стали

| Стали                                        | Температураковки, °C |       |
|----------------------------------------------|----------------------|-------|
|                                              | начало               | конец |
| Углеродистые, содержание C, %:               |                      |       |
| 0,1—0,15                                     | 1200                 | 800   |
| 0,2—0,59                                     | 1150                 | 800   |
| 0,6                                          | 1100                 | 800   |
| 0,7                                          | 1100                 | 800   |
| 0,8—1,2                                      | 1050                 | 800   |
| Никелевые, содержащие, %:                    |                      |       |
| 0,15—0,2 C, 1,0 Ni                           | 1250                 | 950   |
| 0,25—0,3 C, 3,0 Ni                           | 1100                 | 950   |
| 0,25—0,3 C, 5,0 Ni                           | 1100                 | 950   |
| 0,25—0,3 C, 25,0 Ni                          | 1100                 | 1000  |
| Хромоникелевые (0,2—0,3% C, 3% Ni, 1,0% Cr)  | 1100                 | 850   |
| Хромистые с содержанием хрома, %:            |                      |       |
| 0,6—0,9                                      | 1150                 | 800   |
| 1,6—2,1                                      | 1100                 | 850   |
| Кремнемарганцевая (1,5—1,8% Si, 0,7—0,9% Mn) | 1100                 | 850   |
| Хромомолибденовая (0,9—1,2% Cr, 0,3—0,5% Mn) | 1150                 | 850   |

При термической обработке конечные температуры нагрева выбирают в зависимости от вида термообработки по диаграмме Fe—Fe<sub>3</sub>C, либо по таблицам, таким образом, чтобы температура на поверхности изделия была на 30—50°C выше температуры соответствующей критической точки.

Разность температур по сечению тела должна быть с точки зрения технологии как можно меньше, однако такое требование снижает производительность нагревательных устройств (рис. 198, 199).

Конечная неравномерность нагрева стали перед прокаткой выбирается 1—3°C на 1 см толщины изделия. Чем больше толщина изделия, тем меньшую величину принимают для расчета. Желательно, чтобы на оси металла была температура, равная температуре начала прокатки.

Для термообработки  $\Delta t_k$  принимают равным 20—30°C с таким расчетом, чтобы обеспечить структурные превращения по всему сечению изделия.

### Температурные напряжения при нагреве

При нагреве металла возникают температурные напряжения, которые необходимо учитывать для сталей с низким коэффициентом теплопроводности. При температурах выше 500°C температурные напряжения не представляют опасности, поскольку они приводят к пластическим деформациям. Величина температурных напряжений зависит от формы изделия, его размеров и возникающего внутри изделия перепада температур. В свою очередь перепад температур определяется тепловым сопротивлением изделия и тепловым потоком, который зависит от температуры печи (для холодного всада). Значения допустимой температуры печи  $t_{п.доп}$  приведены на рис. 200 и 201. Возникающий внутри изделия перепад температур  $\Delta t$  рассчитывается либо ориентировочно может быть определен по рис. 202. Распределение возникающих внутри изделия тем-

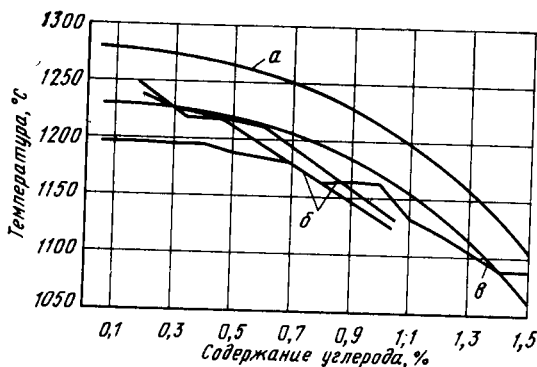


Рис. 198. Влияние содержания углерода на температуру нагрева углеродистых и легированных сталей:  
а — по данным американских заводов; б — по данным трубных заводов; в — по данным Златоустовского завода

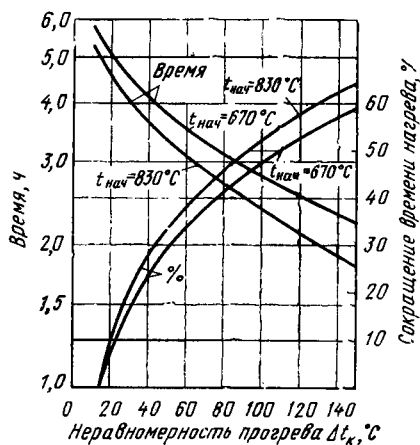


Рис. 199. Изменение продолжительности нагрева горячих слитков в зависимости от разности температур по их сечению в конце нагрева

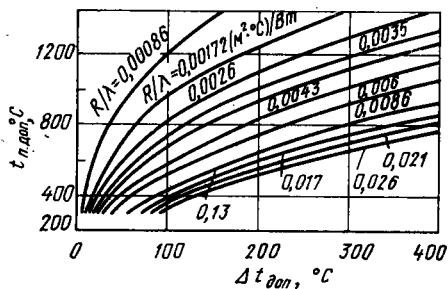


Рис. 200. Допустимая температура печи  $t_{п.доп}$  для пластины в зависимости от максимально допустимой разности температур поверхности и середины металла  $\Delta t_{доп}$

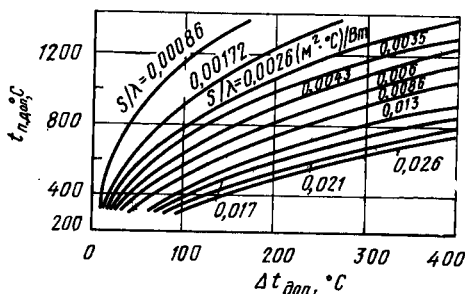


Рис. 201. Допустимая температура печи  $t_{п.доп}$  для цилиндра в зависимости от максимально допустимой разности температур поверхности и середины металла  $\Delta t_{доп}$

температурных напряжений и их величина могут быть определены по формулам:

для пластины

$$\sigma = \frac{\beta E}{1-\nu} \frac{q S}{2 \lambda} \left( \frac{1}{3} - \frac{x^2}{S^2} \right); \quad \sigma = \frac{\beta E}{1-\nu} \frac{C_n S^2}{2 a} \left( \frac{1}{3} - \frac{x^2}{S^2} \right);$$

$$\sigma = \frac{\beta E}{1-\nu} \Delta t \left( \frac{1}{3} - \frac{x^2}{S^2} \right); \quad \Delta t_{доп} = \frac{1,05 \sigma_{доп}}{\beta E}; \quad C_n^{доп} = \frac{2,1 a \sigma_{доп}}{\beta E S^2};$$

для цилиндра

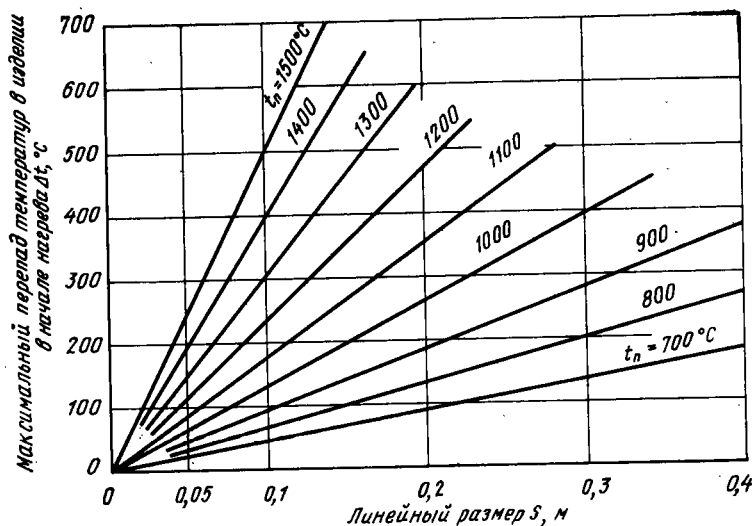
$$\sigma_z = \frac{\beta E}{1-\nu} \frac{q R}{2 \lambda} \left( \frac{1}{2} - \frac{r^2}{R^2} \right);$$

$$\sigma_z = \frac{\beta E}{1-\nu} \frac{C_n R^2}{4 a} \left( \frac{1}{2} - \frac{r^2}{R^2} \right);$$

$$\sigma_z = \frac{\beta E}{1-\nu} \Delta t \left( \frac{1}{2} - \frac{r^2}{R^2} \right);$$

$$\Delta t_{доп} = \frac{1,4 \sigma_{доп}}{\beta E}; \quad C_n^{доп} = \frac{5,6 \sigma_{доп} a}{\beta E R^2}.$$

Рис. 202. Максимальный перепад температур внутри изделия  $\Delta t$ , устанавливающийся в начале нагрева при температуре печи  $t_n = \text{const}$  принято:  $\lambda = 40 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ ;  $C = 4 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°K}^4)$



### Окисление стали при нагреве

Различают два вида окалины: так называемую печную и воздушную, т. е. окалину, образовавшуюся при нагреве стали в атмосфере печи или во время пребывания металла с высокой температурой в воздушной среде. Такое разделение окалины связано с условиями ее возникновения, определяющими протекание физико-химических процессов окалинообразования. Эти различия определяют и отличие состава и свойств окалины.

«Воздушная» (атмосферная) окалина имеет поверхностный слой, состоящий из гематита ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), толщиной 5—10%, и нижний слой, состоящий из магнетита ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), относительная толщина которого составляет 90—95%.

«Воздушная» окалина почти не имеет пор, она плотно прилегает к поверхности металла и хорошо инкрустируется в его поверхность в процессе обработки давлением. В такой окалине содержится ~72% железа.

Толщина окалины, образовавшейся на воздухе на поверхности среднеуглеродистой стали обыкновенного качества, может быть определена по формуле

$$S_a = 0,34 \exp\left(-\frac{1620}{T}\right) + 0,67 \exp\left(-\frac{3150}{T}\right) \lg \tau,$$

где  $S_a$  — толщина слоя «воздушной» окалины, мм;  
 $T$  — абсолютная температура поверхности, К;  
 $\tau$  — время окисления в секундах, с.

Приведенное уравнение описывает результаты проведенных нами экспериментов в диапазоне температур 900—1300°С и охватывает отрезок времени 6—600 с.

Количество образовавшейся окалины  $\Pi$  можно определить по формуле

$$\Pi_a = 0,1 S_a \rho_a \text{ г/см}^2.$$

Здесь  $\Pi_a$  — количество продукта, образовавшегося при окислении металла в воздушной атмосфере, г/см<sup>2</sup>;

$S_a$  — толщина слоя «воздушной» окалины, мм;

$\rho_a$  — плотность окалины, г/см<sup>3</sup>. Для «воздушной» окалины на стали можно принять  $\rho_a = 6 \text{ г/см}^3$ .

Угар металла  $Y_a$ , т. е. количество металла, перешедшего в окалину при его пребывании в воздушной среде при высокой температуре, найдем по следующему выражению

$$Y'_a = P_a [\text{Fe}]_a = 0,1 S_{a.p} [\text{Fe}]_a \approx 0,43 S_a \text{ г/см}^2,$$

или

$$Y_a = 4,3 S_a \text{ кг/м}^2,$$

где  $Y_a$  — угар металла, г/см<sup>2</sup> или кг/м<sup>2</sup>;

$[\text{Fe}]_a$  — доля железа в «воздушной» окалине,  $[\text{Fe}]_a = 0,72$ .

«Печная» окалина в наиболее общем случае содержит все три окисла железа:  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и  $\text{FeO}$ . Окислы располагаются последовательно один за другим, более богатые по кислороду — ближе к газовой атмосфере в таком порядке: гематит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), вюстит ( $\text{FeO}$ ).

В окалине, образовавшейся при нагреве стали в печной атмосфере в течение нескольких часов, соотношение слоев примерно таково: 1:3:100. Составленная нами схема разреза окалины представлена на рис. 203.

«Печная» окалина содержит 90—98% вюстита, имеет в среднем ~34% пор, она слабо сцеплена с поверхностью металла, в ней массовое содержание железа достигает 77,5%.

Для определения толщины «печной» окалины автором совместно с Ф. Лораном была предложена формула для определения толщины окалины на слитках после их пребывания в нагревательных колодцах. Она может быть распространена и на металлургические печи других конструкций:

$$S^2 = S_p^2 + k_n^2 (\tau_n - \beta_n n) + k_t^2 \left( \frac{T_t}{2C} \tau_n + \tau_t \right) + k_v^2 \beta_v m,$$

где  $S$  — толщина окалины, мм (индексы «р» здесь относятся к разведению, «п» — посадке, «н» — нагреву, «т» — томлению и «в» — выдаче слитков); толщина окалины  $S_p$  на слитке перед посадкой в колодец равна ~0,2 мм;

$k$  — постоянная окалинообразования, мм/ч<sup>0,5</sup>;

$\tau$  — время, ч;

$T$  — температура, К;

$n$  — номер посадки слитка;

$m$  — номер выдачи слитка;

$\beta_n$  — время загрузки одного слитка, ч;

$\beta_v$  — время выдачи одного слитка, ч; время загрузки и время выдачи одного слитка обычно составляют величину  $\beta_n = \beta_v \approx 0,02—0,03$  ч;

$C$  — постоянная, равная 10 125.

Формула получена при допущении, что процесс окалинообразования идет по параболическому закону

$$S \cdot dS = \frac{1}{2} k^2 d\tau.$$

Величина постоянной окалинообразования для чистого железа и мягких сталей может быть определена по рис. 204 (кривая а).

В области высоких температур можно пользоваться также уравнением

$$k = \exp (-10125/T + 7,25),$$

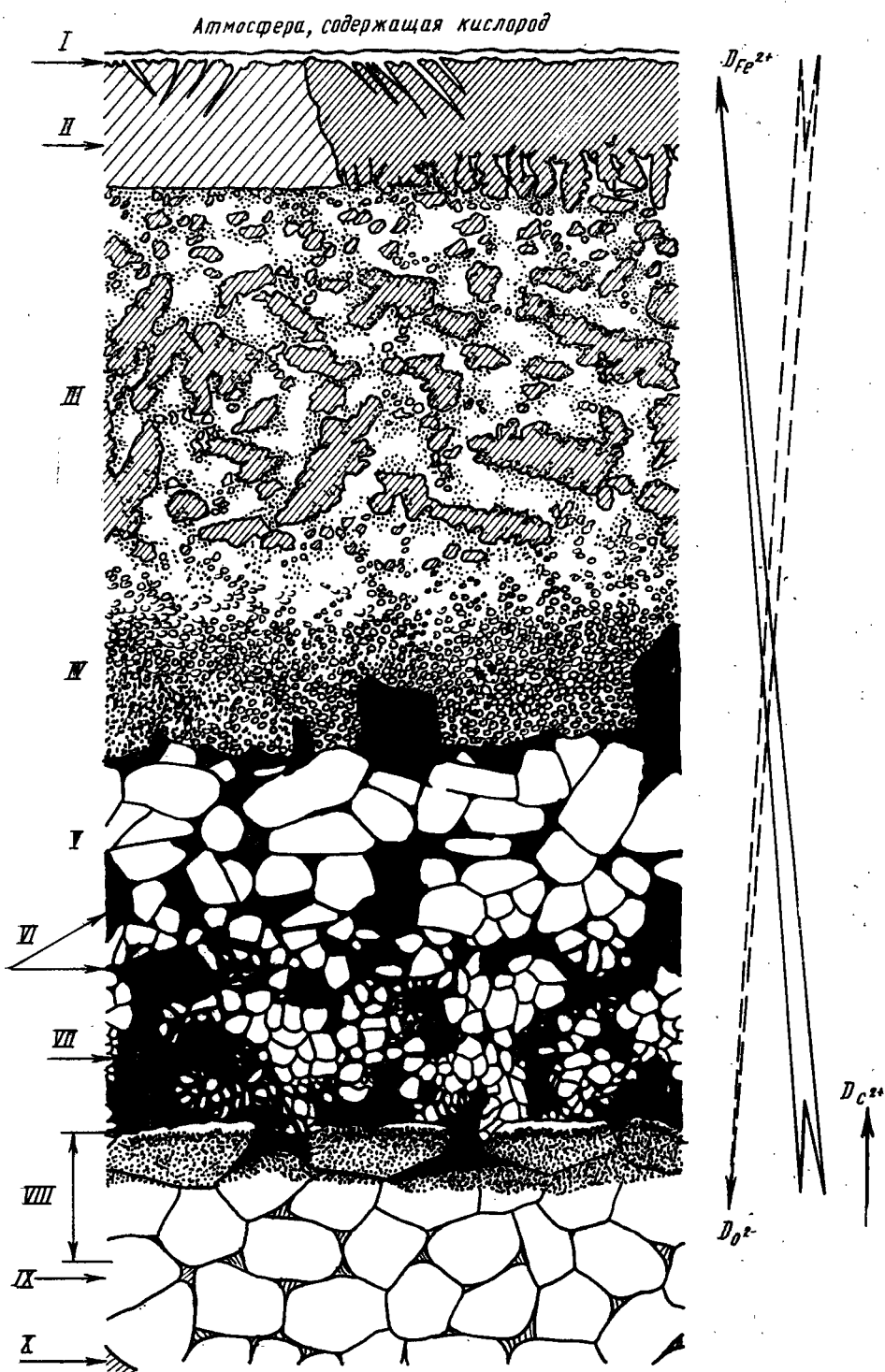


Рис. 203. Схема разреза окалины на стали (пропорциональность толщин различных фаз не соблюдается):

I — гематит  $Fe_2O_3$ ; II — кристаллы магнетита  $Fe_3O_4$ ; III — вюстит  $FeO$  и избыточный  $O_2$ . В холодном состоянии смесь  $Fe + Fe_3O_4$ ; IV — реакционная зона  $Fe^{2+} + O_2 \rightleftharpoons FeO$ ; V — вюстит; насыщенный железом. Первоначальная граница металла; VI — поры; VII — окислы примесей и легирующих сталей; VIII — зона обезуглероживания; IX — феррит; X — перлит

которое, однако, не всегда удачно аппроксимирует экспериментальные данные (рис. 203, кривая *в*). Необходимо также иметь в виду, что на величину постоянной окалинообразования  $k$  весьма сильно влияют легирующие элементы, а также примеси в стали. Наличие даже небольших количеств других элементов в железе может приводить к уменьшению  $k$  в несколько раз.

Формула для определения толщины окалины может быть применена при использовании любых видов топлива, сжигаемого с обычным значением коэффициента расхода воздуха больше единицы. Этой формулой

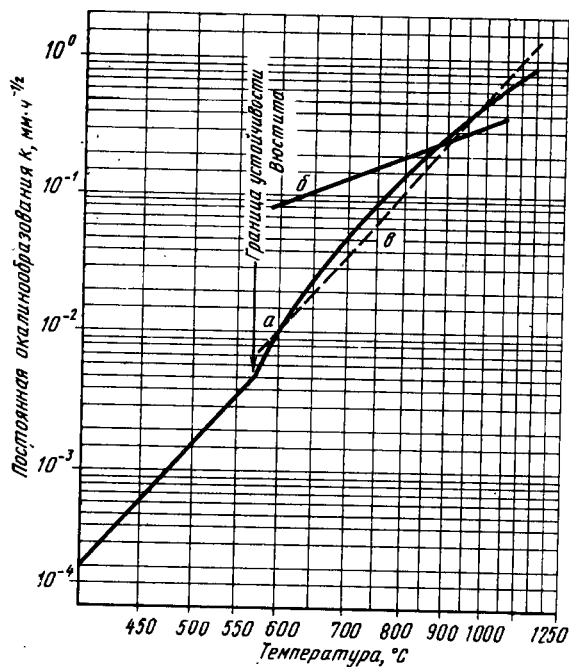


Рис. 204. Значения постоянной окалинообразования в зависимости от температуры:  
*а* — в воздухе; *б* — в среде водяного пара; *в* — по уравнению для  $k$

нельзя пользоваться в тех случаях, если температура поверхности металла превышает температуру плавления окалины ( $1370^{\circ}\text{C}$ ), когда температура посада выше  $1100^{\circ}\text{C}$  и в тех случаях, когда факел пламени ударяет о поверхность нагреваемого изделия.

Формула выведена для условия нагрева металла с постоянной скоростью изменения температуры поверхности, однако это допущение не вносит существенной ошибки в результаты расчета при рассмотрении практических случаев нагрева слитков в колодцах.

Зная величину толщины окалины  $S$  мм, образующейся на поверхности металла, можно рассчитать угар металла  $U$  на единицу площади по формуле

$$U = 3,16 S \text{ кг/м}^2.$$

Если известны размеры нагреваемого изделия, то можно пересчитать угар металла на 1 т нагреваемых изделий делением на величину материальной нагрузки  $G/F$  (масса/поверхность нагрева).

В обжимных цехах металлургических заводов потери металла от окисления составляют величину 0,6—1,8% от веса (массы посаженных слитков).

Таблица XIII-10

## Характеристики окислов железа

| Оксид            | Молекулярная масса | Плотность, кг/м³ | Пределы изменения состава оксида (для O₂), % | Концентрация кислорода в окисле гO₂/см³ оксида | Стандартное значение энтальпии $\Delta H_{298}^\circ$ Дж/моль | Тепловой эффект реакции образования оксида с кислородом, кДж |            |                | Температура плавления, °С |
|------------------|--------------------|------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------|----------------|---------------------------|
|                  |                    |                  |                                              |                                                |                                                               | на 1 кмоль Fe                                                | на 1 кг Fe | на 1 кг оксида |                           |
| Fe₂O₃ (гематит)  | 160                | 5700             | 30,04—30,06                                  | 1,74                                           | —822706                                                       | 411337                                                       | 7345,3     | 5143,9         | 1583                      |
| Fe₃O₄ (магнетит) | 232                | 5900             | 27,64—28,36                                  | 1,63                                           | —1117876                                                      | 745113                                                       | 6652,8     | 4817,4         | 1597                      |
| FeO (вюстит)     | 72                 | 6250             | 23,16—25,60                                  | 1,39                                           | —266699                                                       | 800100                                                       | 4762,5     | 3703,3         | 1370                      |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аладьев И. Т. — «Известия АН СССР. ОТН», 1951, № 11, с. 39—48.  
 Арманд А. А. — «Известия ВТИ», 1940, № 8, с. 128—134.  
 Арсеев А. В. Сжигание природного газа. М., Metallurgizdat, 1963. 276 с. с ил.  
 Артюхов И. М., Шорин С. Н. Газоснабжение. М., изд. МКХ РСФСР, 1956. 326 с. с ил.  
 Баскаков А. П. Скоростной безокислительный нагрев и термическая обработка в кипящем слое. М., «Металлургия», 1968. 223 с. с ил.  
 Блох А. Г. Основы теплообмена излучением. М., Госэнергоиздат, 1962. 331 с. с ил.  
 Боксерман Ю. И. Развитие газовой промышленности СССР. М., Гостехиздат, 1958. 130 с. с ил.  
 Боришайский В. М. — В кн.: Вопросы аэродинамики и теплообмена в котельно-топочных процессах. М., Госэнергоиздат, 1958, с. 73—85 с ил.  
 Браун К. Печи заводов черной металлургии. М., Metallurgizdat, 1961. 306 с. с ил.  
 Брицке Э. В. Термические константы неорганических веществ. Изд-во АН СССР. 1949. 1010 с. с ил.  
 Будрий Д. В., Красовский Б. А. — «Нагрев и охлаждение тел различной формы». М., Metallurgizdat, 1941 (Труды Уральского политехнического института. Вып. XVIII.), с. 30—35.  
 Варгафтик Н. Б., Олещук О. Н. — «Теплоэнергетика», 1955, № 4, с. 19—30.  
 Варгафтик Н. Б., Неймарк Б. Е., Олещук О. Н. — «Изв. ВТИ», 1952, № 9, с. 1—7.  
 Вейник А. И. Теплообмен между слитком и изложницей. М., Metallurgizdat, 1959. 357 с. с ил.  
 Гельд П. В., Купровский Б. Б., Серебрейников И. Н. — «Теплоэнергетика», 1956, № 6, с. 45—51.  
 Георгиевский З. В. — «Журнал русского физико-химического общества». Т. XXXV, 1903.  
 Глииков М. А. Основы общей теории тепловой работы печей. М., Metallurgizdat, 1959. 416 с. с ил.  
 Глииков М. А. Методы расчета промышленных печей. М., ОНТИ, 1938. 348 с. с ил.  
 Гольдфарб Э. М. — ЖТФ, т. XXIV, 1954, вып. 5, с. 899—906.  
 Гольдфарб Э. М. Теплотехника металлургических процессов. М., «Металлургия», 1967. 439 с. с ил.  
 Горение и газификация топлива. М., Изд-во АН СССР, 1959 (Труды ИГи АН СССР. Т. XI), с. 73—89. Авт.: Н. В. Лавров, В. И. Филиппова и др.  
 Гребер Г. Введение в теорию теплопередачи. М., Гостехиздат, 1929. 192 с. с ил.  
 Гребер Г., Эрк С. Основы учения о теплообмене. М., ОНТИ, 1936. 327 с. с ил.  
 Грошев М. В. Газовые нагревательные печи. М., Машгиз, 1951. 176 с. с ил.  
 Грошев М. В. Основы расчета промышленных печей. Киев, Гостехиздат УССР, 1954. 199 с. с ил.  
 Гусовский В. Л., Оркин Л. Г., Тымчак В. М. Методические печи. Под ред. В. М. Тымчака. М., «Металлургия», 1970. 430 с. с ил.

- Диомидовский Д. А. *Металлургические печи*. М., Metallurgizdat, 1961. 728 с. с ил.
- Еринов А. Е., Сорока Б. С. *Рациональные методы сжигания газового топлива в нагревательных печах*. Киев, «Техніка», 1970. 252 с. с ил.
- Зеньковский А. Г. *Методическое пособие по курсовому проектированию*. Под ред. А. И. Ващенко. М., изд. МВМИ, 1966. 136 с. с ил.
- Зижеев Т. А. *Справочник по качеству ископаемых углей и горючих сланцев Советского Союза*. М., Углетехиздат, 1957. 144 с. с ил.
- Иванцов Г. П. *Нагрев металла*. М., Metallurgizdat, 1948. 191 с. с ил.
- Идельчик И. Е. *Справочник по гидравлическому сопротивлению фасонных и прямых частей трубопроводов*. М., ЦАГИ, 1950. 610 с. с ил.
- Идельчик И. Е. *Гидравлические сопротивления*. М., Госэнергоиздат, 1954. 316 с. с ил.
- Инструкция по футеровке доменных печей и их вспомогательных устройств*. М., Metallurgizdat, 1956. 270 с.
- Исаченко В. П., Осинова В. А., Сукомел А. С. *Теплопередача*. М., «Энергия», 1969. 439 с. с ил.
- Искрасов К. Д. *Жароупорный бетон*. М., Госстройиздат, 1957. 224 с. с ил.
- Казанцев Е. И., Гончаров Н. В. — «Сталь», 1971, № 8, с. 760—762.
- Казанцев Е. И., Семияки И. Д. — «Труды металлургического факультета Донецкого политехнического института». М., Metallurgizdat, 1955. с. 38—39 с ил.
- Казанцев Е. И. — «Сталь», 1957, № 4, с. 358—361 с ил.
- Капустин Е. А., Глинков Г. М. *Движение газов в мартеновских печах*. М., Metallurgizdat, 1963. 272 с. с ил.
- Карабин А. И. *Сжигание жидкого топлива в промышленных установках*. М., Metallurgizdat, 1957. 221 с. с ил.
- Карпов А. К. — «Газовая промышленность», 1957, № 7, с. 9—14, № 10, с. 1—7 с ил.
- Касенков М. А. *Работа и обслуживание кузнечных печей*. М., Машгиз, 1950. 221 с. с ил.
- Китаев Б. И. *Теплообмен в шахтных печах*. М., Metallurgizdat, 1945. 48 с. с ил.
- Китаев Б. И., Ярошенко Ю. Г., Лазарев Б. Л. *Теплообмен в доменной печи*. М., «Металлургия», 1966. 535 с. с ил.
- Ключников А. Д., Иванцов Г. П. *Теплопередача излучением в огнетехнических установках*. М., «Энергия», 1970. 400 с. с ил.
- Кйорре Г. Ф. *Топочные процессы*. М., Госэнергоиздат, 1951. 262 с. с ил.
- Копытов В. Ф. *Нагрев стали в печах*. Metallurgizdat, 1955. 264 с. с ил.
- Краткий справочник металлурга*. М., Внешторгиздат, 1960.
- Краткий справочник металлурга*. Под ред. В. П. Адриановой. М., Metallurgizdat, 1965. 370 с. с ил.
- Кржижановский Р. Е. — «Теплоэнергетика», 1958, № 1, с. 44—48.
- Кривандин В. А., Марков Б. Л. *Металлургические печи*. М., «Металлургия», 1967. 672 с. с ил.
- Кривандин В. А. *Светящееся пламя природного газа*. М., «Металлургия», 1973. 136 с. с ил.
- Куколев Г. В., Цейтлин Л. А. — «Огнеупоры», 1955, № 1, с. 17—19 с ил.
- Кутателадзе С. С., Борншанский В. М. *Справочник по теплопередаче*. М., Госэнергоиздат, 1959. 414 с. с ил.
- Кутателадзе С. С., Стиркович М. А. *Гидравлика газожидкостных систем*. М., Госэнергоиздат, 1958. 232 с. с ил.
- Кутателадзе С. С. *Теплопередача при конденсации и кипении*. М., Машгиз, 1952. 230 с. с ил.
- Кэй Д., Лэби Т. *Справочник физика-экспериментатора*. Пер. с англ. М., ИЛ, 1949. 298 с. с ил.
- Кэмп Д. М. и Френсис К. Б. *Производство и обработка стали*. Пер. с англ. М., Metallurgizdat, 1948. 730 с. с ил.
- Лавров Н. В. *Физико-химические основы горения и газификации топлива*. М., Metallurgizdat, 1957. 288 с. с ил.
- Лапушкин С. А. — «Труды Московского авиационного института». М., Оборонгиз, 1955, № 51, с. 31—35.
- Ларичев В. А. *Качественные стали для современных котельных установок*. М., Госэнергоиздат, 1951. 166 с. с ил.
- Лебедев Н. С., Телегин А. С. *Нагревательные печи*. С., Машгиз, 1962. 344 с. с ил.
- Лившиц Б. Г. *Физические свойства сплавов*. М., Metallurgizdat, 1946. 318 с. с ил.
- Линчевский В. П. *Нагревательные печи*. М., Metallurgizdat, 1948. 691 с. с ил.
- Лифшиц М. А. *Огнеупоры в черной металлургии*. М., Metallurgizdat, 1960. 267 с. с ил.
- Лыков А. В. *Теория теплопроводности*. М., Гостеортехиздат, 1952. 392 с. с ил.
- Лычагин А. С. *Проектирование мартеновских печей*. М., Metallurgizdat, 1963. 280 с. с ил.
- Мак—Адамс В. *Теплопередача*. Пер. с англ. М., Metallurgizdat, 1961. 686 с. с ил.
- Мамыкин П. С., Стрелов К. К. *Технология огнеупоров*. М., Metallurgizdat, 1959. 446 с. с ил.

- Марон В. Д. Теплопроводность литых сталей. — «Изв. вуз. Черная металлургия», 1958, № 4, с. 81—91.
- Машиностроение. Энциклопедический справочник. Т. 1. М., Машгиз, 1947. 548 с. с ил.
- Машиностроение. Энциклопедический справочник. Т. 3. М., Машгиз, 1947. 712 с. с ил.
- Машиностроение. Энциклопедический справочник. Т. 4. М., Машгиз, 1947. 428 с. с ил.
- Металлургические печи. Ч. I. Под ред. М. А. Глинкова. М., Металлургиздат, 1963. 440 с. с ил. Авт.: Д. В. Будрин, М. А. Глинков, М. В. Канторов и др.
- Металлургические печи. Ч. II. Под ред. М. А. Глинкова. М., «Металлургия», 1964. 343 с. с ил. Авт.: А. И. Ващенко, М. А. Глинков, Б. И. Китаев, Н. Ю. Тайц.
- Металлургическое топливо. Справочник. М., «Металлургия», 1965. 470 с. с ил. Авт.: М. Б. Равич, С. С. Дворин, А. Я. Лепков и др.
- Методы определения теплопроводности и температуропроводности. Под ред. А. В. Лыкова. М., «Энергия», 1973. 380 с. с ил.
- Авт.: Т. Н. Абраменко, Г. М. Волохов, В. П. Козлов, В. И. Миткалинный, А. Г. Шашков. Струйное движение газов в печах. М., Металлургиздат, 1961. 184 с. с ил.
- Михайленко А. Я., Осокин Н. Е., Грановский Б. Л. Печи для цветной металлургии. М., «Металлургиздат», 1946. 383 с. с ил.
- Михеев М. А. — «Известия АН СССР. ОТН.» М., 1947, № 10, с. 1357—1363 с ил.; № 10, с. 1448—1455 с ил.
- Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. М., «Энергия», 1973. 319 с. с ил.
- Назаров И. С. Основы теории промышленных печей. М., Металлургиздат, 1941. 314 с. с ил.
- Невский А. С. Лучистый теплообмен в печах и топках. М., «Металлургия», 1971. 438 с. с ил.
- Неймарк Б. Е. — «Теплоэнергетика», 1955, № 9, с. 36—39; 1955, № 3, с. 97—102.
- Немчинский А. Л. Тепловые расчеты термических печей. М., Судпромгиз, 1953. 104 с. с ил.
- Никшов А. С. и др. — «Вестник машиностроения», 1953, № 4, с. 125.
- Норкин Н. Н. — «Промышленные печи». М., Госэнергоиздат, 1953 (ВНИИТЭС; Труды конференции), с. 210—217.
- Огнеупоры. Справочник огнеупорной промышленности. Т. II. М., Госстройиздат, 1939.
- Печи для нагрева металла. Под ред. акад. Н. Н. Доброхотова. М., Машгиз, 1941. 416 с. с ил.
- Равич М. Б. Упрощенная методика теплотехнических расчетов. М., Изд-во АН СССР, 1969. 287 с. с ил.
- Расчеты нагревательных печей. Под ред. Н. Ю. Тайца. Киев, «Техника», 1969. 538 с. с ил. Авт.: С. И. Аверин, Э. М. Гольдфарб, А. Ф. Кравцов и др.
- Рафалович И. М. Тепловые расчеты пламенных печей. М., Металлургиздат, 1949. 256 с. с ил.
- Розенгарт Ю. И. — «Научные труды Днепропетровского металлургического института». Вып. XXXI. М., Металлургиздат, 1954 (Днепропетровский металлургический институт), с. 111—105 с ил.
- Ромадин В. П. Пылеприготовление. М., Госэнергоиздат, 1953. 115 с. с ил.
- Рысин С. А. Вентиляционные установки машиностроительных заводов. М., Машгиз, 1961. 704 с. с ил.
- Свенчанский А. Д. Электрические промышленные печи. Ч. I. Госэнергоиздат, 1958. 288 с. с ил.
- Свенчанский А. Д., Смелянский М. Я. Электрические промышленные печи. Ч. II. М., «Энергия», 1970. 264 с. с ил.
- Семикин И. Д., Аверин С. И. — «Изв. вузов. Черная металлургия», 1962, № 4, с. 140—152; № 8, с. 158—169; № 12, с. 162—173.
- Семикин И. Д., Аверин С. И., Радченко И. И. Топливо и топливное хозяйство металлургических заводов. М., «Металлургия», 1965. 392 с. с ил.
- Семикин И. Д. — «Изв. вуз. Черная металлургия», 1959, № 3, с. 17—28 с ил.
- Семикин И. Д. Использование природного газа в металлургическом производстве. Днепропетровск, изд. Укр. НТО ЧМ (Днепропетровский металлургический институт), 1957. 42 с. с ил.
- Семикин И. Д., Радченко И. И. — Использование природного газа в металлургических печах, ГОСИНТИ, 1960, с. 11—22 с ил.
- Семикин И. Д. — «Научные труды» (Днепропетровский металлургический институт). вып. XXII, Днепропетровск, изд. ДМИ, 1949, с. 21—53.
- Семикин И. Д. — В кн.: Расчеты нагревательных печей. Киев, Укртехиздат, 1958. 422 с. с ил.
- Синярев Г. В., Добровольский М. В. Жидкостные ракетные двигатели. М., Оборонгиз, 1953. 210 с. с ил.
- Скворцов А. А., Акименко А. Д., Кузелев М. Я. Нагревательные устройства. М., «Высшая школа», 1965. 443 с. с ил.
- Скворцов А. А. — «Строительная промышленность», 1951, № 10, с. 18—20.

- Соколов Б. Я., Зингер М. Н. Струйные аппараты. М., Госэнергоиздат, 1960. 195 с. с ил.
- Соколов В. Н. Расчеты нагрева металла в металлургических печах. М., Металлургиздат, 1956. 131 с. с ил.
- Справочник конструктора печей. Под ред. Ю. В. Грум-Гржимайло. ОНТИ НКТП, 1935. 320 с. с ил.
- Справочник конструктора печей прокатного производства. Под ред. В. М. Тымчака. М., «Металлургия», 1970. 991 с. с ил. Авт.: А. Л. Бергауз, В. Л. Гусовский, И. И. Иванова и др.
- Справочник на огнеупорные изделия, материалы и сырье. Под ред. Г. Г. Фельдгандлера. М., Металлургиздат, 1961. 339 с. с ил.
- Справочник строителя промышленных печей. М., Госстройиздат, 1952. 597 с. с ил.
- Справочник теплотехника предприятий черной металлургии. Т. I. М., Металлургиздат, 1953. 872 с. с ил.
- Сушкин И. Н. Теплотехника. М., Металлургиздат, 1960. 728 с. с ил.
- Тайц Н. Ю., Гольдфарб Э. М. — «Труды Днепропетровского НТО». М., Металлургиздат, 1953. 100 с. с ил.
- Тайц Н. Ю., Розенгарт Ю. И. Методические нагревательные печи. М., Металлургиздат, 1964. 408 с. с ил.
- Тайц Н. Ю. Технология нагрева стали. М., Металлургиздат, 1962. 507 с. с ил.
- Тебеньков Б. П. Рекуператоры для промышленных печей. М., Металлургиздат, 1958. 404 с. с ил.
- Тепловой расчет котельных агрегатов. М., «Энергия», 1973. 295 с. с ил.
- Теплотехника окискования железорудного сырья. Под ред. С. Г. Братчикова. М., «Металлургия», 1970. 343 с. с ил. Авт.: С. Г. Братчиков, Ю. Л. Берман, Я. Л. Белоцерковский и др.
- Теплотехнические расчеты металлургических печей. Под ред. А. С. Телегина. М., «Металлургия», 1970. 528 с. с ил. Авт.: Б. И. Китаев, Б. Ф. Зобнин, В. Ф. Ратников, А. С. Телегин, и др.
- Теплотехнические расчеты установок силикатной промышленности. М., Госстройиздат, 1951. 489 с. с ил. Авт.: Д. Б. Гизбург и др.
- Теплофизические свойства веществ. Справочник. Под ред. Н. Б. Варгафтика. М., Госэнергоиздат, 1956. 367 с. с ил.
- Термодинамические свойства газов. М., Машгиз, 1953. 373 с. с ил. Авт.: М. П. Вукалович, В. А. Кириллин, С. А. Ремизов и др.
- Техническая энциклопедия. Т. 7. М., ОГИЗ, 1931. 484 с. с ил.
- Тимрот Д. Л. — ЖТФ, 1935, т. V, вып. 6, с. 17—25.
- Топерверх Н. И., Шерман М. Я. Теплотехнические измерительные и регулирующие приборы. М., Металлургиздат, 1956. 606 с. с ил.
- Троицкий Г. И. Свойства чугуна. М., Металлургиздат, 1944. 289 с. с ил.
- Тройб С. Г. — В кн.: Металлургические печи. Под ред. М. А. Глинкова. М., Металлургиздат, 1951, с. 21—148 с ил.
- Тринг Д. Наука о пламенах и печах. М., Металлургиздат, 1959. 482 с. с ил.
- Тринкс В., Моугинней М. Г. Промышленные печи. Т. I. М., «Металлургия», 1966. 499 с. с ил.
- Умрихин П. В., Кокарев Н. И. Основы скоростной мартеновской плавки. М., Металлургиздат, 1951. 133 с. с ил.
- Филянд М. А., Семенова Е. И. Свойства редких металлов. М., Металлургиздат, 1953. 413 с. с ил.
- Франчук А. У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов. М., Стройиздат, 1949. 120 с. с ил.
- Фреберг А. К., Бабус С. В. Высокоогнеупорные материалы. М., Металлургиздат, 1941. 269 с. с ил.
- Фристром Р. М., Вестенберг А. А. Структура пламени. М. «Металлургия», 1969. 380 с. с ил.
- Черная Р. — «Холодильная техника», 1948, № 4, с. 28—31.
- Чиркин В. С. Теплопроводность промышленных материалов. 2-е изд., дополн. и перераб. М., Машгиз, 1962. 247 с. с ил.
- Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов. М., Физматгиз, 1959. 356 с. с ил.
- Чудновский А. Ф. Теплообмен в дисперсных средах. М., Гостехтеоретиздат, 1954. 324 с. с ил.
- Шак А. Промышленная теплопередача. Пер. с нем. М., Металлургиздат, 1961. 452 с. с ил.
- Шевельков В. Л. Теплофизические характеристики изоляционных материалов. М., Госэнергоиздат, 1958. 96 с. с ил.
- Шишаков Н. В. Основы производства горючих газов. М., Госэнергоиздат, 1948. 479 с. с ил.
- Шмыков А. А. Справочник термиста. М., Машгиз, 1961. 287 с. с ил.
- Шорин С. Н., Артюхов И. М. Газоснабжение. Изд. Министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1956. 89 с. с ил.
- Шорин С. Н. Теплопередача. М., «Высшая школа», 1964. 490 с. с ил.

- Шекин Р. В. и др. Справочник по теплоснабжению и вентиляции в гражданском строительстве. Киев, Госстройиздат УССР, 1959. 395 с. с ил.
- Эккерт Э. Р. Введение в теорию тепло- и массообмена. М., Госэнергоиздат, 1957. 280 с. с ил.
- Энциклопедия металлофизики. Т. I. ОНТИ, 1937. 420 с. с ил.
- Янкелев Л. Ф. Термоизоляция и огнеупорная футеровка в нефтяной промышленности. М., Гостоптехиздат, 1947. 301 с. с ил.
- Янкелев А. Ф. — «Энергохозяйство за рубежом», 1957, № 1, с. 23—28.
- Anselm W., Koch A. Brenntechnik mit Sauerstoff. Schriftenreihe Steine u. Erden. Berlin, 1944, B. 7.
- Braune H., Linke R. L. f. Phys. Chem., 1930, (A), Bd 148, S. 195.
- Chemical Engineering, 1953, v. 60, № 5, p. 300—312.
- Cude A. L. — «J. of the Iron and Steel», Institute Now., 1953, Marmh, p. 271—280.
- Donaldson J. W. Special. Report. 1932. v. 2. Rep. № 4, p. 112. Iron and Steel Inst.
- Essre H., Ensterbrok H. — «Arch. für das Eisenhüttenwesen», 1941, Bd. 7, S. 284—295.
- Henning F. Wärmetechnische Richtwerte. Berlin, 1938.
- Special Report. Iron and Steel Institute, Rep. № 2, 1939, v. 24, p. 173—181.
- Jung D., Schmick H. L. f. Phys. Chem., 1930, (B), Bd 7, S. 130.
- «Journ. of the Iron and Steel Institute», 1946, v. 154, № 2, p. 83—121.
- Kazantsev E. I., Lorang F. — «Revue Universelle des Mines», Serie 9. 1964, v. XX, № 2, Febr., p. 1—18.
- Kazantsev E. I. Sbornik vědeckých prací Vysoké školy báňské v Ostravě, Ročník XIV. 1968, číslo 7. Řada Hutnická článěk 508. IV Hutnická vědecká konference, p. 161—178.
- Kingery R. — «Journal Am. Ceramic Soc.», 1955, v. 38, № 7, p.
- Klinchardt H. — «Annalen d. Physik», 1927, № 4, p. 84.
- Licht W. — «Journ. of Phys. Chem.», 1944, v. 48, № 1, p. 39—48.
- Mark L. S. Mechanical Engineers Handbook, 5-th ed. Mc. Grow—Hill, N.—Y., 1954.
- McAdams W. H. Heat Transmission. N. — Y., 1942.
- Morawe F. — «Giesserei», 1930, H. O, S. 234—236.
- Norris R., Steid D. — «Trans. ASME», 1940, № 6, p. 75—90.
- Shomate H., Naylor B. — «Journ. Am. Chem. Soc.», 1945, v. 67, № 1, p.
- Tamman G. u. Bandel G. — «Archiv für das Eisenhüttenwesen», 1934, Bd 7, № 10, S. 571—578.
- Teyssler I., Jirásek V. — «Priloha Casopisi Energetika», čís. 6, 1954.

# **ПРИЛОЖЕНИЯ**

## **ПРИЛОЖЕНИЕ 1**

### **ПЕРЕВОД НЕКОТОРЫХ ВЕЛИЧИН ИЗ ПРЕЖНИХ СИСТЕМ В МЕЖДУНАРОДНУЮ СИСТЕМУ ЕДИНИЦ СИ**

(старая  $\times$  коэффициент = новая; новая: коэффициент = старая)

| Наименование величины        | Обозначение | Размерность                                             |                                                                             | Соотношение                                         | Для перевода в систему СИ данные в старых таблицах следует умножить на |
|------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
|                              |             | прежние системы                                         | СИ                                                                          |                                                     |                                                                        |
| Энергия и работа             | $A, E$      | $\text{кг} \cdot \text{м} \text{ (кгс} \cdot \text{м)}$ | $\text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж}$                                       | $1 \text{ кгс} \cdot \text{м} = 9,80665 \text{ Дж}$ | $\sim 9,81$                                                            |
| Энтальпия (теплосодержание)  | $i, I, H$   | $\text{ккал} \cdot \text{кг}$                           | $\text{кДж/кг}$                                                             |                                                     |                                                                        |
| Теплота плавления            | $Q, q$      | $\text{ккал/м}^3$                                       | $\text{кДж/м}^3$                                                            | $1 \text{ кал} = 4,1868 \text{ Дж}$                 | 4,1868                                                                 |
| Теплота сгорания             | $Q_R^p$     |                                                         |                                                                             |                                                     |                                                                        |
| Теплоемкость                 | $c$         | $\text{ккал/ (кг} \cdot ^\circ\text{C)}$                | $\text{кДж/ (кг} \cdot ^\circ\text{C)} = \text{кДж/ (кг} \cdot \text{K)}$   |                                                     |                                                                        |
| Энтальпия                    | $S$         | $\text{ккал/ (м}^3 \cdot \text{K)}$                     | $\text{кДж/ (м}^3 \cdot ^\circ\text{C)} = \text{кДж/ (м}^3 \cdot \text{K)}$ | $1 \text{ кал} = 4,1868 \text{ Дж}$                 | 4,1868                                                                 |
| Коэффициент теплопроводности | $\lambda$   | $\text{ккал/ (м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C)}$  | $\text{Вт/ (м} \cdot ^\circ\text{C)} = \text{Вт/ (м} \cdot \text{K)}$       | $1 \text{ ккал/ч} = 1,163 \text{ Вт}$               | 1,163                                                                  |

| Наименование величины                   | Обозначение        | Размерность                                                                                                      |                                                                                                                                 | Соотношение                                                                                                                                                                                                                                               | Для перевода в систему СИ данные в старых таблицах следует умножить на        |
|-----------------------------------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
|                                         |                    | прежние системы                                                                                                  | СИ                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                               |
| Коэффициенты: теплопередачи теплоотдачи | $k, \alpha$        | ккал/(м <sup>2</sup> ·ч·°С)                                                                                      | Вт/(м <sup>2</sup> ·°С) = Вт/(м <sup>2</sup> ·К)                                                                                | 1 ккал/ч = 1,163 Вт                                                                                                                                                                                                                                       | 1,163                                                                         |
| Коэффициент излучения                   | $\epsilon, \sigma$ | ккал/(м <sup>2</sup> ·ч·°К <sup>4</sup> )                                                                        | Вт/(м <sup>2</sup> ·°К <sup>4</sup> ) = Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )                                                    | 1 ккал/ч = 1,163 Вт                                                                                                                                                                                                                                       | 1,163                                                                         |
| Давление                                | $p, h$             | бар<br>кгс/м <sup>2</sup> = 1 мм H <sub>2</sub> O =<br>= 1 мм вод. ст.<br>мм рт. ст.<br>кгс/см <sup>2</sup> = ат | 1 Н/м <sup>2</sup> = 1 па (паскаль)<br>1 Н/м <sup>2</sup> = 1 Па<br>1 Н/м <sup>2</sup> = 1 Па<br>1 Н/м <sup>2</sup> = 1 Па<br>? | 1 бар = 1·10 <sup>5</sup> Н/м <sup>2</sup><br>1 кгс/м <sup>2</sup> = 9,80665 Н/м <sup>2</sup><br>1 мм рт. ст. = 133,332 Н/м <sup>2</sup><br>1 ат = 0,98·10 <sup>5</sup> Н/м <sup>2</sup><br>1 ат = 98 кН/м <sup>2</sup><br>1 ат = 0,098 МН/м <sup>2</sup> | 10 <sup>5</sup><br>9,80665<br>133,332<br>98·10 <sup>3</sup><br>98,066<br>~0,1 |
| Напряжение (механическое)               | $\sigma$           | кгс/мм <sup>2</sup>                                                                                              | 1 Н/м <sup>2</sup> = 1 Па                                                                                                       | 1 кгс/мм <sup>2</sup> = 0,98·10 <sup>7</sup> Н/м <sup>2</sup><br>1 кгс/мм <sup>2</sup> = 9,8 МН/м <sup>2</sup>                                                                                                                                            | 9,8·10 <sup>6</sup><br>9,8                                                    |
| Поверхностное натяжение                 | $\sigma$           | эрг/см <sup>2</sup>                                                                                              | Дж/м <sup>2</sup>                                                                                                               | 1 эрг/см <sup>2</sup> = 1·10 <sup>-3</sup> Дж/м <sup>2</sup><br>или 1 мДж/м <sup>2</sup>                                                                                                                                                                  | 10 <sup>-3</sup>                                                              |
| Вязкость                                | $\eta$             | кгс·с/м <sup>2</sup><br>гс/(см·с) = пуаз<br>кгс/(м·с)                                                            | Н·с/м <sup>2</sup>                                                                                                              | 1 кгс·с/м <sup>2</sup> = 9,80665 Н·с/м <sup>2</sup><br>1 гс/(см·с) = 0,1 (Н·с)/м <sup>2</sup><br>1 кгс/(м·с) = 1 Н·с/м <sup>2</sup>                                                                                                                       | 9,80665<br>0,1<br>1,0                                                         |

## Приставки для образования кратных и дольных единиц

|                          |         |    |                  |           |   |                   |
|--------------------------|---------|----|------------------|-----------|---|-------------------|
| Тера ТТ 10 <sup>12</sup> | Гекто г | г  | 10 <sup>2</sup>  | Микро мкм | μ | 10 <sup>-6</sup>  |
| Гига ГГ 10 <sup>9</sup>  | Дека да | да | 10 <sup>1</sup>  | Нано н    | н | 10 <sup>-9</sup>  |
| Мега ММ 10 <sup>6</sup>  | Деци д  | д  | 10 <sup>-1</sup> | Пико п    | п | 10 <sup>-12</sup> |
| Кило кк 10 <sup>3</sup>  | Санτι с | с  | 10 <sup>-2</sup> | Фемто ф   | ф | 10 <sup>-15</sup> |
|                          | Милли м | м  | 10 <sup>-3</sup> | Атто а    | а | 10 <sup>-18</sup> |

**ПЕРЕВОДНЫЕ МНОЖИТЕЛИ ДЛЯ ПЕРЕХОДА ОТ НЕКОТОРЫХ  
АНГЛИЙСКИХ И АМЕРИКАНСКИХ ЕДИНИЦ К ЕДИНИЦАМ СИСТЕМЫ СИ**

| Наименование единицы                                             | Сокращенное обозначение  | Значение переводной единицы<br>в единицах системы СИ |
|------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------------------------|
| Ярд . . . . .                                                    | yd                       | 0,9144 м (точно)                                     |
| Фут . . . . .                                                    | ft                       | 0,3048 м (точно)                                     |
| Дюйм . . . . .                                                   | in                       | 0,0254 м (точно)                                     |
| Миля . . . . .                                                   | mile                     | 1609,344 м (точно) $\approx 1,609$ км                |
| Квадратный дюйм . . . . .                                        | in <sup>2</sup>          | $6,4516 \cdot 10^{-4}$ м <sup>2</sup> (точно)        |
| Квадратный фут . . . . .                                         | ft <sup>2</sup>          | 0,0929030 м <sup>2</sup>                             |
| Квадратный ярд . . . . .                                         | yd <sup>2</sup>          | 0,836127 м <sup>2</sup>                              |
| Кубический ярд . . . . .                                         | yd <sup>3</sup>          | 0,764555 м <sup>3</sup>                              |
| Кубический фут . . . . .                                         | ft <sup>3</sup>          | 0,0283168 м <sup>3</sup>                             |
| Кубический дюйм . . . . .                                        | in <sup>3</sup>          | $16,3871 \cdot 10^{-6}$ м <sup>3</sup>               |
| Кубический фут на фунт-моль . . . . .                            | —                        | 0,062428 м <sup>3</sup> /кмоль                       |
| Фут в секунду (иа секунду в квадрате) . . . . .                  | ft/s                     | 0,3048 м/с (точно)                                   |
| Фунт (торговый) . . . . .                                        | lb                       | 0,45359237 кг                                        |
| Унция . . . . .                                                  | oz                       | $28,3495 \cdot 10^{-3}$ кг                           |
| Тонна (Брит) . . . . .                                           | ton                      | 1016,05 кг                                           |
| Аптекарская унция . . . . .                                      | oz apoth                 | $31,1035 \cdot 10^{-3}$ кг                           |
| Фунт на кубический фут . . . . .                                 | lb/ft <sup>3</sup>       | 16,0185 кг/м <sup>3</sup>                            |
| Фунт на кубический дюйм . . . . .                                | lb/in <sup>3</sup>       | 27680 кг/м <sup>3</sup>                              |
| Фунт-сила . . . . .                                              | lbf                      | 4,44822 Н                                            |
| Тонна-сила . . . . .                                             | tonf                     | 9964,02 Н                                            |
| Фунт-сила-фут . . . . .                                          | lbf·ft                   | 1,35582 Н·м                                          |
| Фунт-квадратный дюйм . . . . .                                   | lb·in <sup>2</sup>       | $2,9264 \cdot 10^{-4}$ кг·м <sup>2</sup>             |
| Фунт-сила на квадратный фут . . . . .                            | lbf/ft <sup>2</sup>      | 1,48816 Н/м <sup>2</sup>                             |
| Фунт-сила на квадратный дюйм . . . . .                           | lbf/in <sup>2</sup>      | 6894,76 Н/м <sup>2</sup>                             |
| Фут вод. ст. . . . .                                             | ft H <sub>2</sub> O      | 2989,07 Н/м <sup>2</sup>                             |
| Дюйм вод. ст. . . . .                                            | in H <sub>2</sub> O      | 249,089 Н/м <sup>2</sup>                             |
| Дюйм рт. ст. . . . .                                             | in Hg                    | 3386,39 Н/м <sup>2</sup>                             |
| Фунт-сила-фут в 1 с . . . . .                                    | lbf·ft/s                 | 1,35582 Вт                                           |
| Квадратный фут в 1 с . . . . .                                   | ft <sup>2</sup> /s       | 0,092903 м <sup>2</sup> /с                           |
| Квадратный фут в 1 ч . . . . .                                   | ft <sup>2</sup> /h       | $25,806 \cdot 10^{-6}$ м <sup>2</sup> /с             |
| Дюйм квадратный в 1 ч . . . . .                                  | in <sup>2</sup> /h       | $17,92111 \cdot 10^{-3}$ м <sup>2</sup> /с           |
| Дюйм квадратный в 1 с . . . . .                                  | in <sup>2</sup> /s       | $6,4516 \cdot 10^{-4}$ м <sup>2</sup> /с (точно)     |
| Фунт-сила-секунда на 1 квадратный фут . . . . .                  | lbf/ft <sup>2</sup>      | 47,8803 Н·с/м <sup>2</sup>                           |
| Британская тепловая единица . . . . .                            | Btu                      | 1055,06 Дж                                           |
| Средняя британская тепловая единица . . . . .                    | Btu <sub>mean</sub>      | 1055,8 Дж                                            |
| Термия . . . . .                                                 | th                       | 4,2 МДж                                              |
| Британская тепловая единица в 1 ч . . . . .                      | Btu/h                    | 0,293071 Вт                                          |
| Британская тепловая единица в 1 с . . . . .                      | Btu/s                    | 1055,06 Вт                                           |
| Тепловая британская единица на 1 фунт . . . . .                  | Btu/lb                   | 2326 Дж/кг (точно)                                   |
| Британская тепловая единица на 1 град Фаренгейта . . . . .       | Btu/deg F                | $1,89911 \cdot 10^3$ Дж/К                            |
| Британская тепловая единица на 1 фунт-град Фаренгейта . . . . .  | Btu/(lb·deg F)           | $4,1868 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К) (точно)                |
| Британская тепловая единица на квадратный дюйм-секунду . . . . . | Btu/(in <sup>2</sup> ·s) | $1,63535 \cdot 10^6$ Вт/м <sup>2</sup>               |

| Наименование единицы                                               | Сокращенное обозначение        | Значение переводной единицы<br>в единицах системы СИ |
|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------|
| Британская тепловая единица на квадратный фут-ч                    | Btu/(ft <sup>2</sup> ·h)       | 3,15461 Вт/м <sup>2</sup>                            |
| Британская тепловая единица на квадратный фут-ч-град Фаренгейта    | Btu/(ft <sup>2</sup> ·h·deg F) | 5,6783 Вт/(м <sup>2</sup> ·K)                        |
| Британская тепловая единица на 1 квадратный дюйм-с-град Фаренгейта | Btu/(in <sup>2</sup> ·s·deg F) | 2,94363·10 <sup>6</sup> Вт/(м <sup>2</sup> ·K)       |
| Британская тепловая единица на 1 фут-ч-град Фаренгейта             | Btu/(ft·h·deg F)               | 1,730741 Вт/(м·K)                                    |
| Британская тепловая единица на 1 дюйм-с-град Фаренгейта            | Btu/(in·s·deg F)               | 7,47681·10 <sup>4</sup> Вт/(м·K)                     |
| Градус Фаренгейта на 1 фут                                         | deg F/ft                       | 1,82269K/м                                           |
| Градус Фаренгейта на 1 дюйм                                        | deg F/in                       | 21,8723K/м                                           |