ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие 5

Введение. Основные положения расчета печей 7

Раздел первый

Расчет нагревательных печей непрерывного действия 11

Глава 1. Особенности расчета нагревательных печей непрерывного действия 11

1.1. Назначение нагревательных печей . 11
1.2. Рекомендуемые температуры нагрева 11
1.3. Особенности учета конвекции . . 11
1.4. Двухзонный и трехзонный теплотехнические режимы нагрева металла 12
1.5. Выбор расчетных участков . . . 12
1.6. Температуры газов, кладки и удельное время нагрева 12
1.7. Расчетная часовая производительность и садка печей 15
1.8. Длина полезного пода, ширина рабочего пространства, площадь и напряжение пода 15
1.9. Тепловая мощность печи и удельный расход тепла 16
1.10. Работа печи при нерасчетных условиях 16

Глава 2. Нагревательные толкательные печи 17

2.1. Характеристика толкательных печей 17
2.2. Классификация печей и условия нагрева металла 17
2.3. Расчетная схема нагрева металла . 17
2.4. Последовательность расчета нагрева металла 18
2.5. Порядок учета влияния подовых труб 19
2.6. Последовательность уточнения результатов и алгоритм расчета нагрева металла 20
2.7. Основные размеры рабочего пространства печи 20
2.8. Тепловой баланс 20
2.9. Пример расчета нагревательной толкательной печи 22

Глава 3. Нагревательные печи с шагающим подом и шагающими балками . 39

3.1. Характеристика печей 39
3.2. Расчетная схема нагрева металла . 39
3.3. Последовательность и алгоритм расчета нагрева металла 39
3.4. Коэффициент заполнения, скорость перемещения металла, длина пода печи 42
3.5. Тепловой баланс 45
3.6. Пример расчета печи с шагающим подом 45

Глава 4. Кольцевые печи 56

4.1. Характеристика печей 56
4.2. Расчетные схемы нагрева металла . 56
4.3. Температурный режим и последовательность расчета нагрева металла . 58
4.4. Садка и основные размеры рабочего пространства 58
4.5. Тепловой баланс 59
4.6. Расчет нагрева металла 59
4.7. Пример расчета кольцевой печи . . 59

Раздел второй

Расчет термических печей непрерывного действия 70

Глава 5. Особенности расчета термических печей 70

5.1. Характеристика термических печей . 70
5.2. Температуры, условия, способы и средства нагрева и охлаждения . . 70
5.3. Особенности нагрева и охлаждения металла и выбор расчетных участков 71
5.4. Особенности расчета теплопередачи 72
5.5. Особенности расчета нагрева и охлаждения металла 73
5.6. Расчет камер охлаждения с распыливанием воды 73
5.7. Расчет камер сушки 73
5.8. Определение производительности и длины печи 74
5.9. Тепловой баланс 74

Глава 6. Секционные печи скоростного нагрева 76

6.1. Характеристика секционных печей . 76
6.2. Особенности теплопередачи . . . 76
6.3. Особенности расчета нагрева металла 76
6.4. Методика расчета нагрева металла . 76
6.5. Расчет изменения температуры заготовки в тамбуре печи 77
6.6. Длина печи, скорость продвижения заготовки и удельное время нагрева 83
6.7. Тепловой баланс 83
6.8. Пример расчета секционной печи скоростного нагрева 83

Глава 7. Печи с роликовым подом . 84

7.1. Характеристика роликовых печей . 84
7.2. Исходные данные и порядок расчета 84
7.3. Особенности расчета теплообмена . 84
7.4. Коэффициент несимметричности нагрева 84
7.5. Тепловой баланс 86
7.6. Пример расчета роликовой печи . 86

Глава 8. Протяжные печи 95

8.1. Характеристика протяжных печей . 95
8.2. Расчет теплопередачи 95
8.3. Особенности расчета нагрева металла 95
8.4. Скорость движения и активная длина металла 95
8.5. Тепловой баланс 96
8.6. Пример расчета вертикальной протяжной печи 96

Раздел третий

Расчет печей периодического действия 114

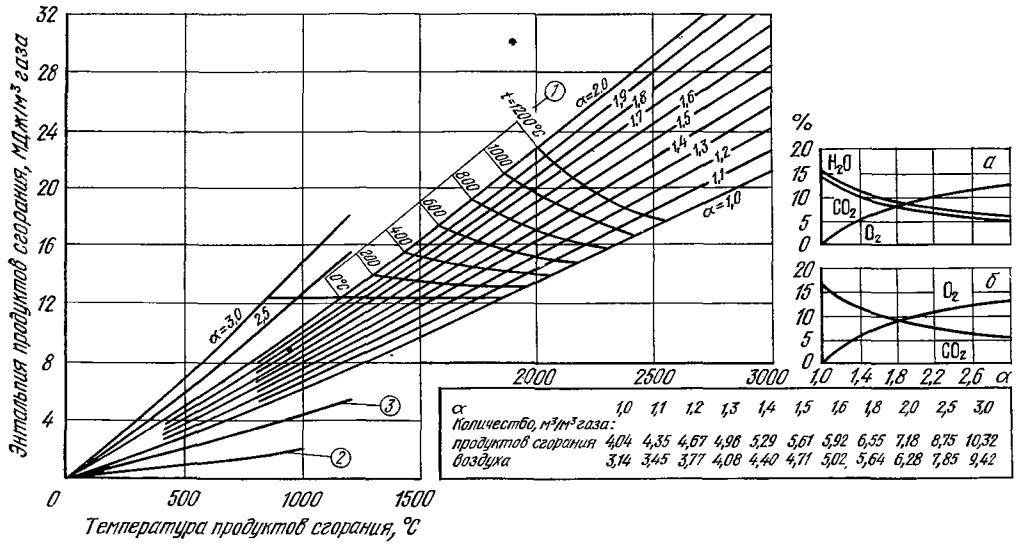


Рис. II.23. Расчет сгорания смеси природного и доменного газов $Q_н^р$=12,55 МДж/м³:

а — состав влажных продуктов сгорания; *б* — то же, сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α=1,0

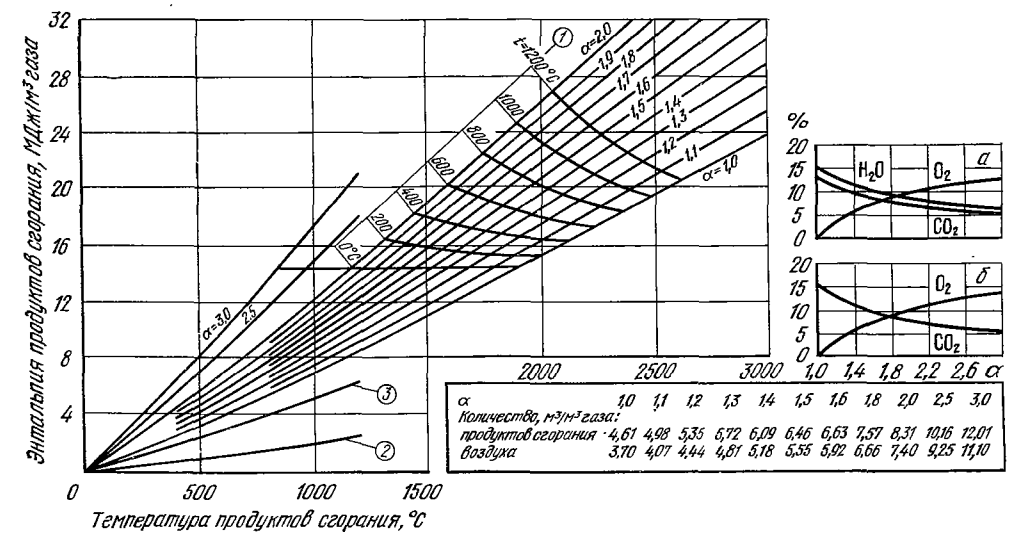


Рис. II.24. Расчет сгорания смеси природного и доменного газов $Q_н^р$=14,65 МДж/м³:

а — состав влажных продуктов сгорания; *б* — то же, сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α=1,0

Стр.

Глава 9. Особенности расчета печей периодического действия 114

9.1. Назначение печей 114
9.2. Температуры нагрева и порядок расчета нагрева и охлаждения металла 114
9.3. Садка и производительность печи, число печей в отделении 114
9.4. Тепловой баланс и удельный расход тепла 115

Глава 10. Нагревательные колодцы . 115

10.1. Характеристика нагревательных колодцев 115
10.2. Классификация колодцев . . . 115
10.3. Температура нагрева слитков и в рабочем пространстве 115
10.4. Режим нагрева слитков, температурный и тепловой режимы работы колодца 116
10.5. Практические данные о продолжительности нагрева слитков . . . 116
10.6. Садка, производительность группы, продолжительность цикла, число групп и характеристики работы отделения колодцев 130
10.7. Тепловая мощность и потребление тепла 131
10.8. Пример расчета числа групп нагревательных колодцев в отделении . 131

Глава 11. Камерные печи 132

11.1. Характеристика печей 132
11.2. Классификация печей и особенности отопления 132
11.3. Особенности расчета теплообмена . 133
11.4. Производительность печи и продолжительность производственного цикла 134
11.5. Тепловой баланс 134
11.6. Пример расчета камерной печи с выкатным подом 134

Глава 12. Колпаковые печи 144

12.1. Характеристика печей 144
12.2. Особенности теплообмена . . . 145
12.3. Расчет температурного поля в рулоне 147
12.4. Определение числа печей (стендов) в отделении и размеров рабочего пространства печи 148
12.5. Тепловой баланс 148
12.6. Примеры расчетов колпаковой печи 148

Раздел четвертый

Расчеты систем, элементов печей и проходящих в них процессов . 162

Глава 13. Расчет нагрева и охлаждения тел 162

13.1. Теплообмен излучением 162
13.2. Теплообмен конвекцией 168
13.3. Нагрев и охлаждение тел . . . 182

Глава 14. Расчеты сгорания топлива и состава печной атмосферы . . . 195

14.1. Расчеты полного сгорания топлива 195
14.2. Расчеты сгорания газообразного топлива в обогащенном кислородом воздухе 203
14.3. Расчеты неполного сгорания газообразного топлива 205
14.4. Расчеты при применении контролируемых атмосфер в печах . . . 208
14.5. Расчеты воспламенения газов и взрывобезопасности рабочего пространства печей 212

Глава 15. Составление тепловых балансов печей 219

15.1. Приход тепла 219
15.2. Расход тепла 220
15.3. Уравнение теплового баланса . . 225
15.4. Тепловой баланс зон печи непрерывного действия 225
15.5. Тепловой баланс зон охлаждения . 225

Глава 16. Расчет движения газов в печах 225

16.1. Гидравлический расчет трассы . . 225
16.2. Расчет инжекционных устройств . 232
16.3. Определение количества и давления транспортирующего газа в печах с газовой подушкой 237

Глава 17. Расчеты сожигательных устройств и нагревателей 241

17.1. Расчет горелок без предварительного смешения 241
17.2. Расчет инжекционных горелок . . 243
17.3. Расчет форсунок высокого давления 249
17.4. Расчет электрических нагревателей сопротивления 253
17.5. Расчет установки радиационных труб 256

Глава 18. Расчет рекуператоров . . 257

18.1. Основные положения расчета рекуператоров 257
18.2. Расчет керамических рекуператоров 259
18.3. Расчет металлических рекуператоров 275

Приложение I. Таблицы и графики для расчета теплообмена 292

Приложение II. Топливо и его сгорание 342

Приложение III. Потери тепла через кладку 401

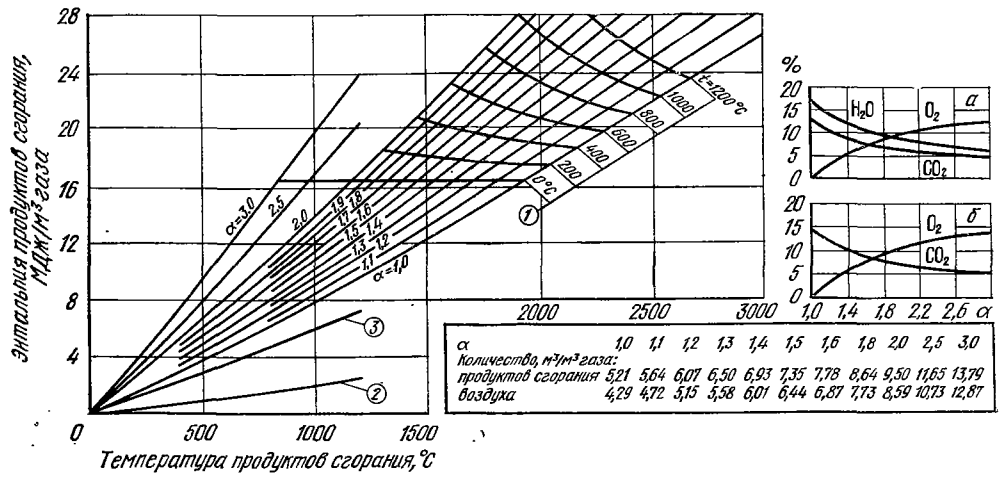
Приложение IV. Механика газов . 416

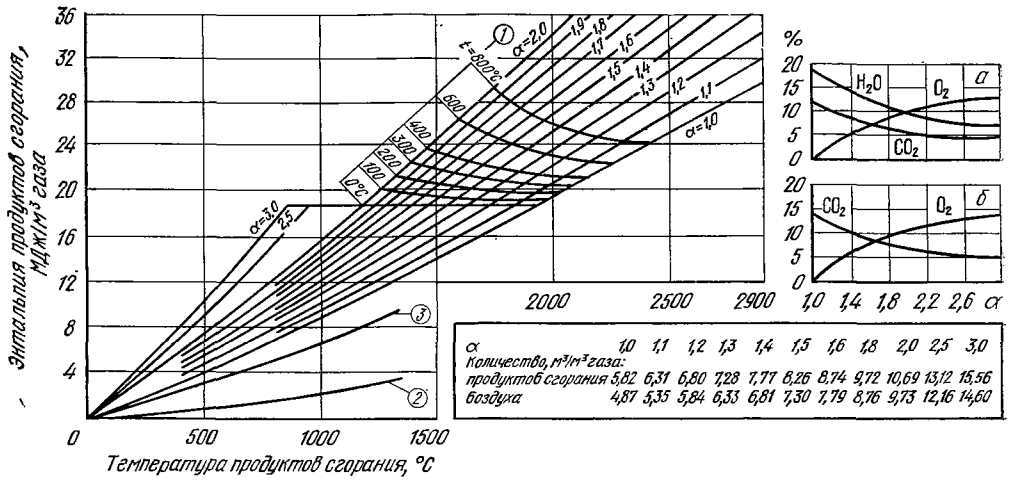
Приложение V. Теплофизические свойства веществ 439

Библиографический список 469

Указатель нормативных материалов Стальпроекта по расчетам нагревательных и термических печей 476

Предметный указатель 479





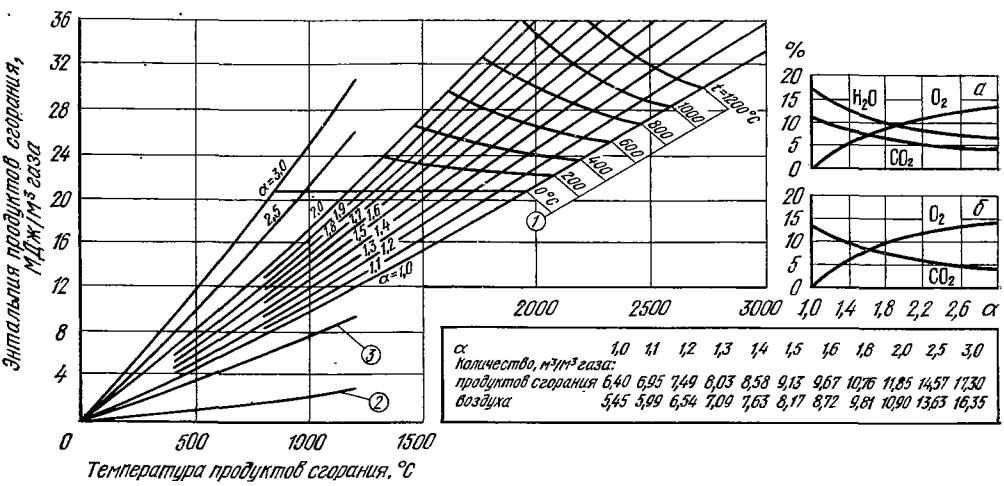


Рис. II.25. $Q_н^р$=16,7 МДж/м³, Рис. II.26. $Q_н^р$=18,8 МДж/м³, Рис. II.27. $Q_н^р$=21,0 МДж/м³:

а — состав влажных продуктов сгорания; *б* — то же, сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α=1,0

РАСЧЕТ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ И ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

СПРАВОЧНИК

Под редакцией
докт. техн. наук *В.М.ТЫМЧАКА*
и канд.техн.наук *В.А.ГУСОВСКОГО*

МОСКВА „МЕТАЛЛУРГИЯ“ 1983

УДК 621.771 : 669.041 (03)

Рецензент проф. докт. техн. наук
МИТКАЛИННЫЙ В. И.

С. Б. ВАСИЛЬКОВА, М. М. ГЕНКИНА, В. Л. ГУСОВСКИЙ, А. Е. ЛИФШИЦ, В. Г. МАСАЛОВИЧ, А. А. ПЕРИМОВ, Э. И. СПИВАК, В. М. ТЫМЧАК

УДК 621.771 : 669.041 (03)

Расчет нагревательных и термических печей: Справ. изд. Под ред. Тымчака В. М. и Гусовского В. Л. Авт.: Василькова С. Б., Генкина М. М., Гусовский В. Л., Лифшиц А. Е., Масалович В. Г., Перимов А. А., Спивак Э. И., Тымчак В. М. М.: Металлургия, 1983. 480 с.

Приведена комплексная методика расчетов различных типов нагревательных и термических печей, основанная на современных достижениях науки и техники. Даны расчеты сожигательных и теплоутилизирующих устройств. Описано движение газов в печах, нагрев и охлаждение металла.

Для инженерно-технических работников научно-исследовательских и проектных организаций и предприятий металлургической и машиностроительной промышленности.

Ил. 293. Табл. 212. Библиогр. список: 125 назв.

Софья Борисовна Василькова,
Мария Марковна Генкина,
Виктор Львович Гусовский
Адольф Ефимович Лившиц,
Владимир Георгиевич Масалович,
Александр Алексеевич Перимов,
Эммануил Иосифович Спивак,
Вячеслав Михайлович Тымчак

РАСЧЕТ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ И ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

СПРАВОЧНИК

Редактор **В. И. Елин**
Художественный редактор **А. И. Гофштейн**
Технический редактор **В. В. Михайлова**
Корректоры **В. М. Гриднева, Г. Ф. Лобанова**

ИБ № 1560

Сдано в набор 27.05.83. Подписано в печать 15.11.83. Т-21177. Формат бумаги 70×108¹/₁₆. Бумага типографская № 1. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 42,0. Усл. кр.-отт. 41,3. Уч.-изд. л. 48,57. Тираж 10 000 экз. Заказ № 482. Цена 3 р. Изд. № 0040

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Металлургия», 119857 ГСП, Москва, Г-34, 2-й Обыденский пер., д. 14
Владимирская типография «Союзполиграфпрома» при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7

Р $\frac{2704070000-214}{040(01)-83}$ 42—83

© Издательство «Металлургия» 1983

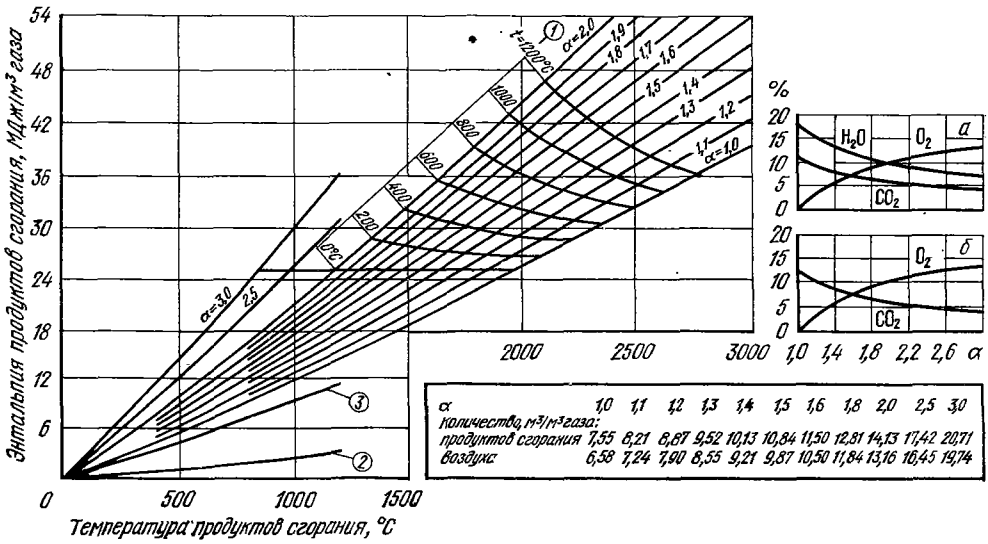


Рис. II.28. Расчет сгорания смеси природного и доменного газов $Q^{р}_{н}$=25,1 МДж/м³:

а — состав влажных продуктов сгорания; *б* — то же, сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α=1,0

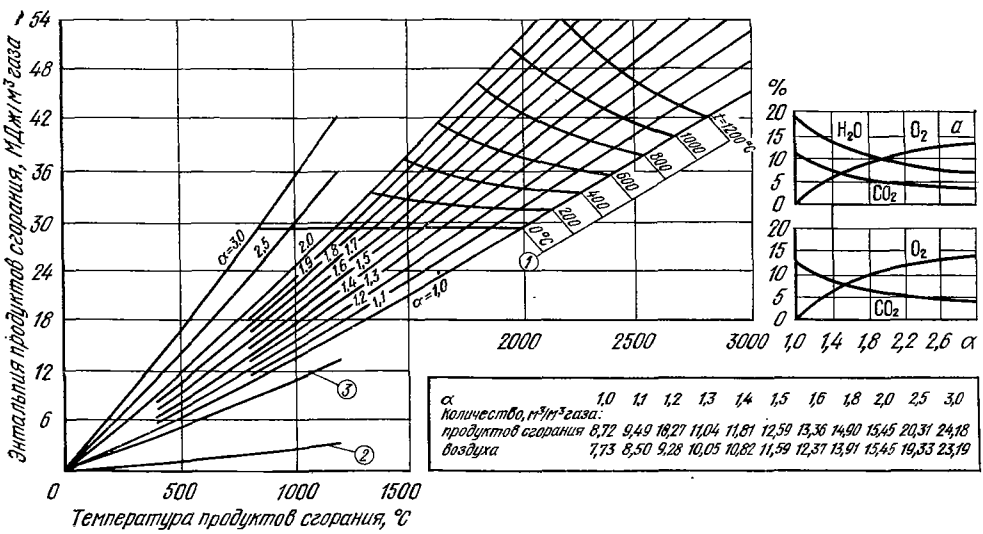


Рис. II.29. Расчет сгорания смеси природного и доменного газов $Q^{р}_{и}$=29,3 МДж/м³:

а — состав влажных продуктов сгорания; *б* — то же, сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α=1,0

ПРЕДИСЛОВИЕ

Впервые в мире строгую научную теорию печей создал В. Е. Грум-Гржимайло. Разработка этой гидравлической теории была проведена им в 1905—1912 гг., а полностью изложена в книге «Пламенные печи», вышедшей в свет в 1924 г. В этом же году В. Е. Грум-Гржимайло основал в Москве Бюро металлургических и теплотехнических конструкций при НТО ВСНХ (институт «Стальпроект»).

Первые 10—12 лет после создания институт был единственной в Советском Союзе оргаиизацией, проектирующей печи практически для всех отраслей промышленности. В настоящее время Стальпроект является головным институтом по проектированию нагревательных и термических печей прокатного производства черной металлургии.

Для создания совершенных печных агрегатов новых типов необходимо было дальнейшее развитие теоретических основ конструирования печей. Поэтому работники Стальпроекта параллельно с проектированием вели и ведут значительные теоретические и экспериментальные исследования в области гидравлического и огиевого моделирования печей, теории инжекции, нагрева и охлаждения металла, теплообмена в печах, взаимодействия печиой атмосферы с нагреваемым металлом, цифрового моделирования процессов, протекающих в печах, разрабатывают алгоритмы и программы для расчетов печей и управления их работой с применением ЭВМ и др.

В своей работе институт, кроме того, использовал и использует результаты исследований, проводимых совместно с другими организациями, а также исследований советских и зарубежных ученых.

С целью дальиейшего развития научных основ конструирования печей в 1931 г. инициативной группой работников Стальпроекта во главе с академиком М. А. Павловым была организована редакционная коллегия для подготовки 3-его, переработанного издания книги «Пламенные печи». В этом издаиии предполагалось дополнительно включить в киигу приложение законов теплопередачи к изучению внутренних и внешних задач теплообмена; тепловые балаисы для определения расходов топлива, а на их основе — и размеров печей; применение метода подобия и т. д. Этот фундаментальный труд, к сожалению, не был завершен.

Для удовлетворения потребности конструкторов в научных осиовах конструирования печных агрегатов уже с 1927 г. в Стальпроекте начали создавать «Записную книжку конструктора печей». В эту книжку включили нормали иистнтута, каждая из которых представляла небольшой оригинальный труд, посвященный какому-либо вопросу расчета или конструирования печей.

В 1933 г. ОНТИ НКТП выпустило 328 нормалей Стальпроекта в виде литографированного издания. Одновременно вышел в свет специальный сборник нормалей в качестве пособия для преподавателей и студентов Московского иистнтута стали.

В 1935 г. впервые 387 нормалей изданы в виде книги «Справочник конструктора печей» под редакцией Ю. В. Грум-Гржимайло. Этот справочник много лет служил настольной книгой для специалистов по конструированию и эксплуатации печей.

Коллектив Стальпроекта продолжал работу по созданию нормалей. Эти нормали получили широкое распространение. В связи со все увеличивающимся спросом на эти иормали возник вопрос об издаиии нового справочника для конструкторов печей.

В 1970 г. издательством «Металлургия» был выпущеи двухтомный «Справочник конструктора печей прокатного производства» под редакцией В. М. Тымчака. В нем был обобщен более чем сорокалетний опыт работы Стальпроекта по расчету и конструированию печей. Весьма большой круг вопросов, рассмотренных в справочнике, пришлось разработать специально или доработать дополнительно. В этом справочнике был дан полный расчет конструироваиия печей. Дальнейшее развитие и совершенствоваиие методик тепловых и аэродинамических расчетов печей, а также разработка и внедрение принципиально новых типов печных агрегатов явились причиной создания настоящего справочника.

Настоящий справочник отличается от первых двух тем, что он целиком посвящен методикам тепловых и аэродинамических расчетов нагревательных и термических печей. Эти расчеты являются основой для выбора размеров и других основных параметров печных агрегатов. Методика остальных видов расчетов, необходимых при конструировании печей, в настоящем справочнике не рассматривается, так как их можно выполнять, используя имеющиеся сейчас справочники по соответствующим специальностям. В справочнике также не приведены данные о конструктивных решениях узлов и систем печей в связи с тем, что в период научно-технической революции эти решения весьма быстро устаревают.

Настоящий справочник характеризуется рядом специфических особенностей. Во-первых, методики расчетов построены в полном соответствии с технологией проектирования печных агрегатов: от определения потребной производительности печей в зависимости от объема производства до выбора числа, размеров и основных параметров печей.

Во-вторых, методики и примеры расчетов сопровождаются рекомендациями о том, как на основании результатов расчетов следует выбирать основные параметры печей: размеры печи, скорость движения металла через печь, тепловую мощность и т. д. С этой целью, например, приводятся данные о технически возможных размерах печей или величинах скорости движения металла в них, остированных или нормализованных рядах размеров печей и их узлов. На основании опыта конструирова-

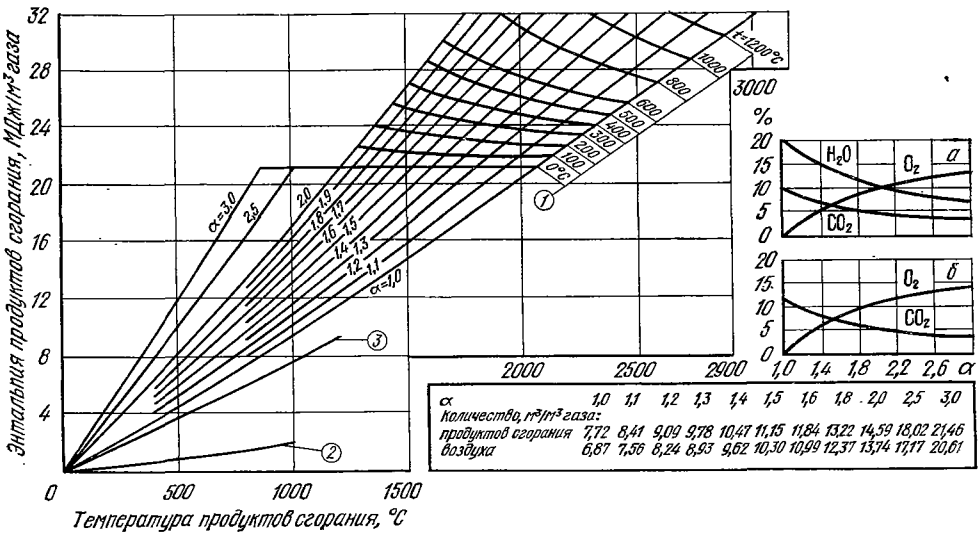


Рис. II.30. Расчет сгорания смеси природиого и коксового газов $Q^{р}_{и}$=26,85 МДж/м³:

а — состав влажных продуктов сгорания; *б* — то же, сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α=1,0

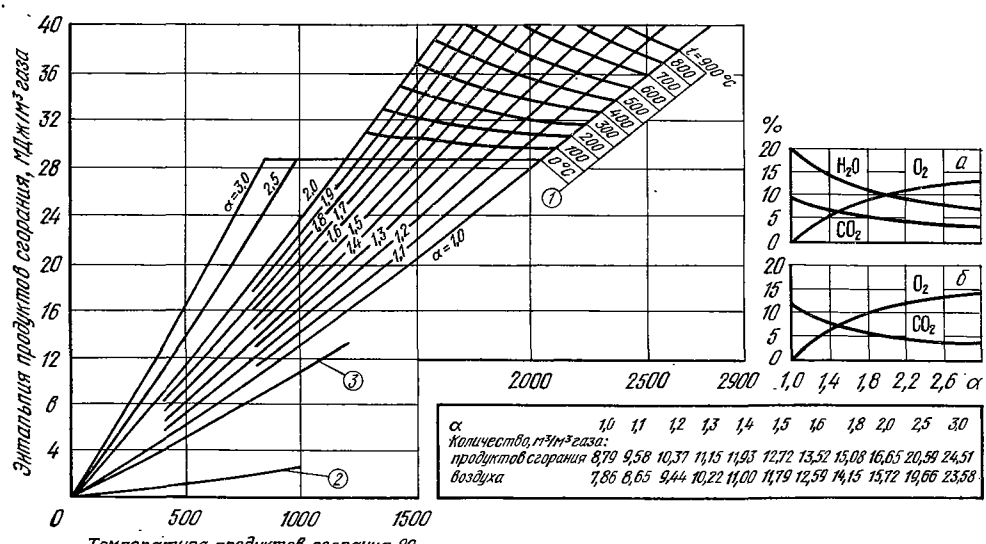


Рис. II.31. Расчет сгорания смеси природного и коксового газов $Q^{р}_{н}$=30,20 МДж/м³:

а — состав влажных продуктов сгорания; *б* — то же, сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в завнсимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α=1,0

ния и эксплуатации печей даются оптимальные значения ряда размеров, определяющих конфигурацию рабочего пространства. Кроме того, приводятся практически достигнутые эксплуатационные характеристики печей, а также определенные на основании опыта эксплуатации исходные данные для расчетов.

В-третьих, в справочнике содержатся все материалы, необходимые для выполнения тепловых и аэродинамических расчетов печных агрегатов. Поэтому при выполнении таких расчетов нет надобности прибегать к каким-либо дополнительным руководствам.

В справочнике приведены методики и примеры расчетов нагревательных и термических печей прокатного и трубопрокатного производств черной металлургии. Однако данный в нем общий подход к методике расчетов и обширный справочный материал делают его полезным для широкого круга специалистов-теплотехников тех отраслей промышленности, в которых применяются печи для нагрева и термической или тепловой обработки металлов и других видов продукции.

Кроме авторов в создании справочника в различной степени принимали участие сотрудники Стальпроекта: В. Н. Аптерман, Т. А. Афанасьева, И. С. Воловик, Л. И. Гармаш, Л. А. Гольдберг, М. М. Коротаев, Г. А. Котюжанский, А. Б. Кошелев, А. Д. Кривошеин, А. А. Лифшиц, Э. М. Маметов, Л. Г. Оркин, В. С. Панфилов, Е. И. Папушина, Л. А. Пинес, А. Ф. Попутников, С. В. Попова, А. Н. Похилевич, Ф. Д. Соколинский, Ю. И. Стоянов, Т. А. Уварова.

Коллектив авторов будет чрезвычайно благодарен всем специалистам, которые возьмут на себя труд дать замечания по содержанию справочника и изложению материала.

Стальпроект.

Замечания можно направлять по адресу: Москва, 125171, Ленинградское шоссе, 18.

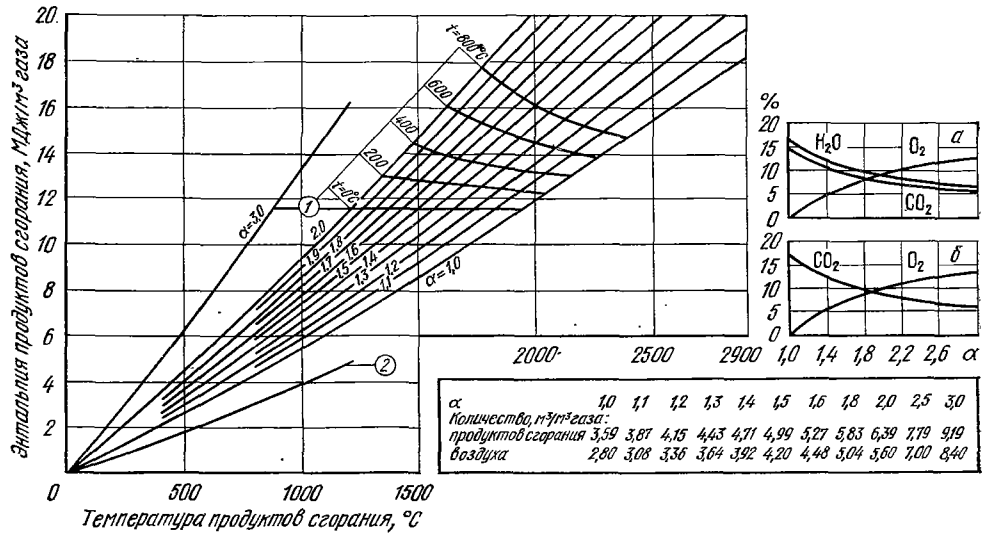


Рис. II.32. Расчет сгорания смеси природного, коксового и доменного газов $Q_{н}^{р}$=11,80 МДж/м³:

а — состав влажных продуктов сгорания; *б* — то же, сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α=1,0

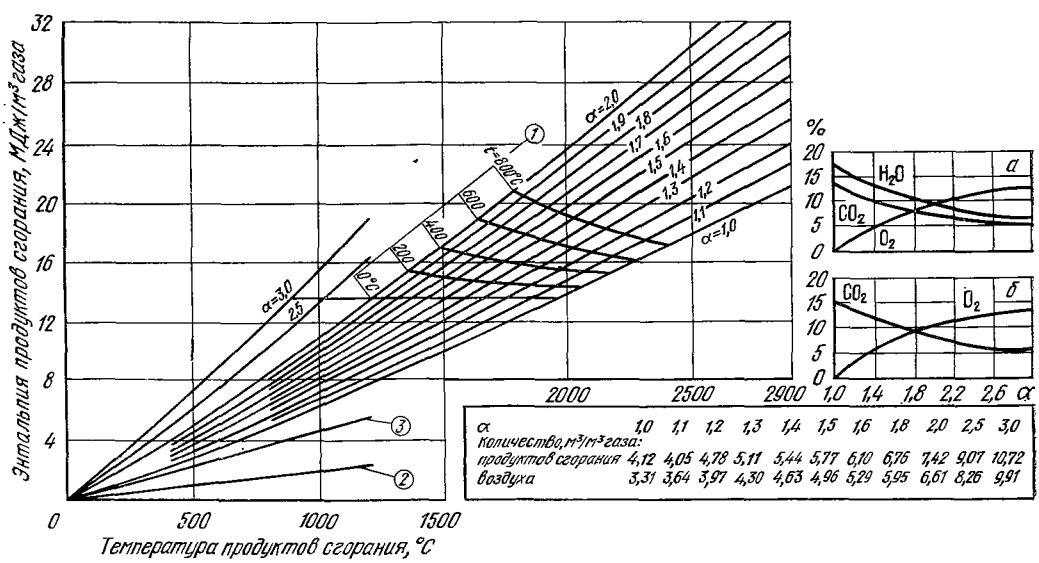


Рис. II.33. Расчет сгорания смеси природного, коксового и доменного газов $Q_{н}^{р}$=13,50 МДж/м³:

а — состав влажных продуктов сгорания; *б* — то же, сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α=1,0

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТА ПЕЧЕЙ

1. Нагревательная и термическая печи являются теплотехническим агрегатом, предназначенным для осуществления определенного технологического процесса. Основная теплотехническая задача таких печей — передать тепло нагреваемому металлу или отнять тепло у нагретого металла в соответствии с технологией его нагрева или термической обработки. Таким образом, определяющим процессом для печного агрегата является теплопередача к металлу, подвергаемому тепловой обработке, и именно расчет этой теплопередачи есть основа расчета нагревательной или термической печи.

Теплопередача к металлу в печах происходит излучением и конвекцией, а распространение тепла внутри металла — теплопроводностью. Основные законы, описывающие эти виды теплопередачи, а также методики определения коэффициентов теплопередачи приведены в главе 13 и приложении I.

Основной расчет теплопередачи дает возможность найти необходимые размеры рабочего пространства или производительность печи, а также теплотехнические характеристики средств нагрева или охлаждения. Для определения других параметров печи необходимо произвести ряд дополнительных расчетов: тепловых, аэродинамических, механических, прочностных и т. д.

В данном справочнике из дополнительных рассматриваются только тепловые и аэродинамические расчеты систем отопления и дымоудаления печи, среди которых важнейшими являются расчеты горения топлива; теплового баланса и расходов топлива; аэродинамики газовых, воздушных и дымовых трактов; сожигательных устройств и нагревателей; теплообмена в рекуператоре.

Методика проведения всех этих расчетов приведена в главах 14—18. Целью расчетов является определение расхода топлива на печь и по зонам, выбор сожигательных устройств и нагревателей, определение размеров рекуператоров и трубопроводов, выбор тягодутьевых устройств.

Расчеты, необходимые при проектировании механического оборудования печей, системы их автоматизации, железобетонных и металлических конструкций и т. д., должны выполняться с использованием справочников по соответствующим отраслям техники и с учетом специфики службы этих устройств и конструкций в условиях печных агрегатов.

2. Для нагревательных печей основные технологические требования состоят в обеспечении нагрева до заданной температуры и заданного перепада температур нагреваемого металла. Процесс нагрева может иметь некоторые ограничения, например заданная скорость нагрева, максимальный перепад температур металла во время нагрева, минимальная продолжительность пребывания поверхности металла при высоких температурах и др.

Для термических печей основные технологические требования состоят в обеспечении нагрева без ограничений или с ограничениями, выдержке при заданной температуре и охлаждении с заданной скоростью.

Для осуществления заданной технологии применяют различные средства нагрева и охлаждения. Основные из них показаны в табл. 1 в зависимости от того, в какой атмосфере происходит нагрев или охлаждение. В этой же таблице для каждого средства нагрева и охлаждения указаны способы, с помощью которых можно влиять на их характеристику (температуру, тепловую мощность) и тем самым устанавливать интенсивность нагрева или охлаждения.

При расчете печи перед конструктором может стоять одна из трех основных задач.

1. Задано начальное и конечное температурные состояния металла, а также условия теплообмена.

Требуется определить продолжительность тепловой обработки. Такая задача возникает, когда конструктору задана технология нерегламентированного нагрева или охлаждения, а ему нужно определить размеры печного агрегата.

2. Задано начальное и конечное температурные состояния металла, а также продолжительность тепловой обработки.

Требуется определить условия теплообмена. Такая задача возникает, когда конструктору задана технология регламентированного нагрева или охлаждения, а ему необходимо выбрать средства нагрева или охлаждения и определить их характеристику.

3. Задано начальное температурное состояние металла, условия теплообмена и продолжительность тепловой обработки.

Требуется определить конечное температурное состояние металла. Такая задача возникает при расчете нагрева или охлаждения металла в отдельных зонах печи или на расчетных участках.

В связи с тем, что расчет обычно ведут по зонам печи или по расчетным участкам, первые две задачи расчета сводят к третьей. При этом неизвестными величинами (в первой задаче — продолжительностью тепловой обработки, во второй — условиями теплообмена) предварительно задаются, а затем проверяют их расчетом.

Так же и при решении третьей задачи приходится предварительно задаваться конечным температурным состоянием металла, а затем проверять его расчетом. Такой метод расчета определяется тем, что взаимосвязи между величинами, входящими в расчетные уравнения, чрезвычайно сложны и ни одну из них определить из этих уравнений в явном виде не удается.

3. Для расчета теплопередачи к металлу в садочных печах металл представляют неподвижным телом, на внешние поверхности которого воздействуют переменные во времени тепловые потоки, определяемые теплообменом излучением и конвекцией между средствами нагрева или охлаждения и поверхностями металла с учетом других тел, участвующих в теплообмене (кладка, муфель, ролики, подовые трубы и т. д.)

Для расчета теплопередачи к металлу в непрерывных печах изменения температуры и тепловой мощности по длине печи представляют как изменение этих величин во времени по мере продвижения металла через печь. При этом расчет будет справедлив только при стационарном режиме работы печи, когда темпе-

ТАБЛИЦА 1. ОСНОВНЫЕ СРЕДСТВА НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ МЕТАЛЛА И СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ИМИ

Вид процесса	Средство нагрева или охлаждения	Способ управления
	В атмосфере продуктов сгорания или воздуха	
Нагрев	Продукты сгорания	Регулированием подачи и сжигания топлива во времени и пространстве
Охлаждение	На воздухе	—
	В воде	—
	Душирование водой	Количеством воды
	Струями воздуха	Скоростью струй и геометрией струйной системы
	Вместе с печью	Подачей атмосферного воздуха в печь
	Водовоздушной смесью	Скоростью смеси и количеством воды
	В контролируемой атмосфере	
Нагрев	Радиационными трубами	Расположением и размерами труб, подачей в них топлива
	Электронагревателями	Расположением и размерами нагревателей, регулированием напряжения тока
	Под муфелем	Регулированием подачи и сжигания топлива во времени и в пространстве
Охлаждение	В камере с тонкой футеровкой	Материалом и толщиной футеровки
	В камере с воздухоохлаждаемыми трубами	Расположением и диаметром труб, скоростью воздуха
	В камере с водяными кессонами	—
	Струями контролируемой атмосферы	Скоростью струй и геометрией струйной системы
	Вместе с печью (муфелем)	Способом охлаждения наружной поверхности печи (муфеля)

ратура и тепловая мощность в каждом сечении печи остаются неизменными во времени.

При изменении параметров нагреваемого металла или производительности печи в непрерывных печах протекают нестационарные, переходные процессы, после чего печь переходит на работу с новым стационарным режимом Этот режим может отличаться от предыдущего как распределением тепла, так и распределением температур по длине печи, однако он по-прежнему остается неизменным во времени.

Для определения параметров печи используют только расчет стационарных режимов, так как именно в нормальном стационарном режиме печь может обеспечить наилучшие показатели работы. Нестационарные режимы, ухудшающие работу печи, снижают средние показатели. Это надо учитывать, если печь должна работать при часто меняющемся сортаменте нагреваемого металла и переменной производительности.

Для расчета нестационарных режимов применяют специальные методики, основанные на использовании ЭВМ, которые в данном справочнике не рассматриваются. Часто при проектировании используют практические данные о продолжительности переходных процессов.

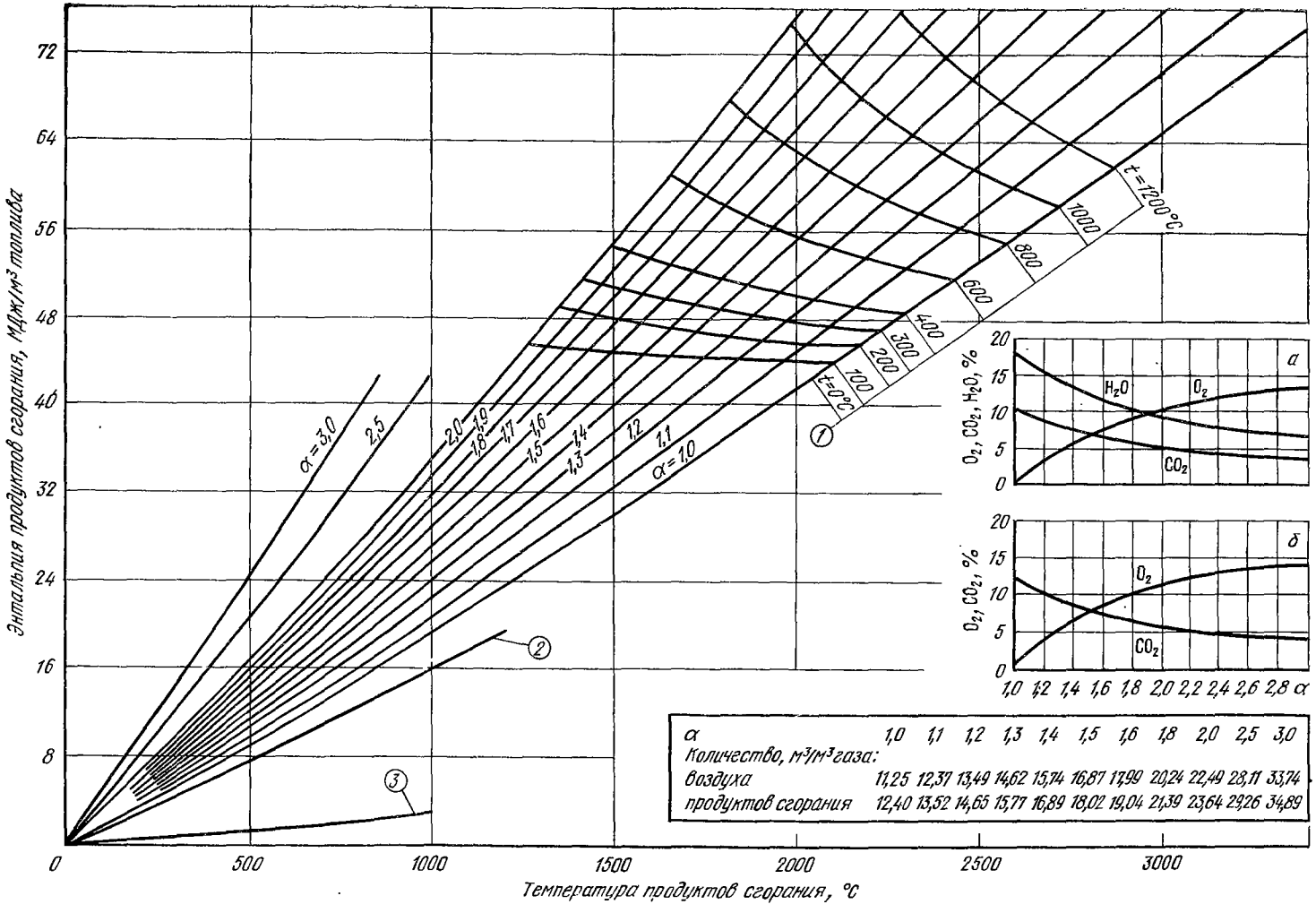
4. Для принятой физической модели температурное поле в металле определяется решением уравнения теплопроводности Фурье при заданных начальных и граничных условиях, соответствующих условиям нагрева или охлаждения.

Решение уравнения теплопроводности принципиально различно для так называемых тонких и массивных тел. Тонкими считают такие тела, у которых перепад температур в процессе нагрева или охлаждения настолько мал, что им можно пренебречь. Таким образом, можно считать, что тонкое тело нагревается равномерно по сечению. В массивных телах перепад температур по сечению достаточно велик и его необходимо учитывать при расчете. Способы определения массивности тела приведены в разд. 13.3.3.

Граничные условия, принимаемые при расчете теплообмена в рабочем пространстве печи, могут быть заданы тремя способами: граничные условия *первого рода*, когда задано распределение температур по поверхности металла в пространстве и во времени; граничные условия *второго рода*, когда задан тепловой поток как функция времени; граничные условия *третьего рода*, когда задана температура средства нагрева или охлаждения и закон теплообмена между ним и поверхностью металла.

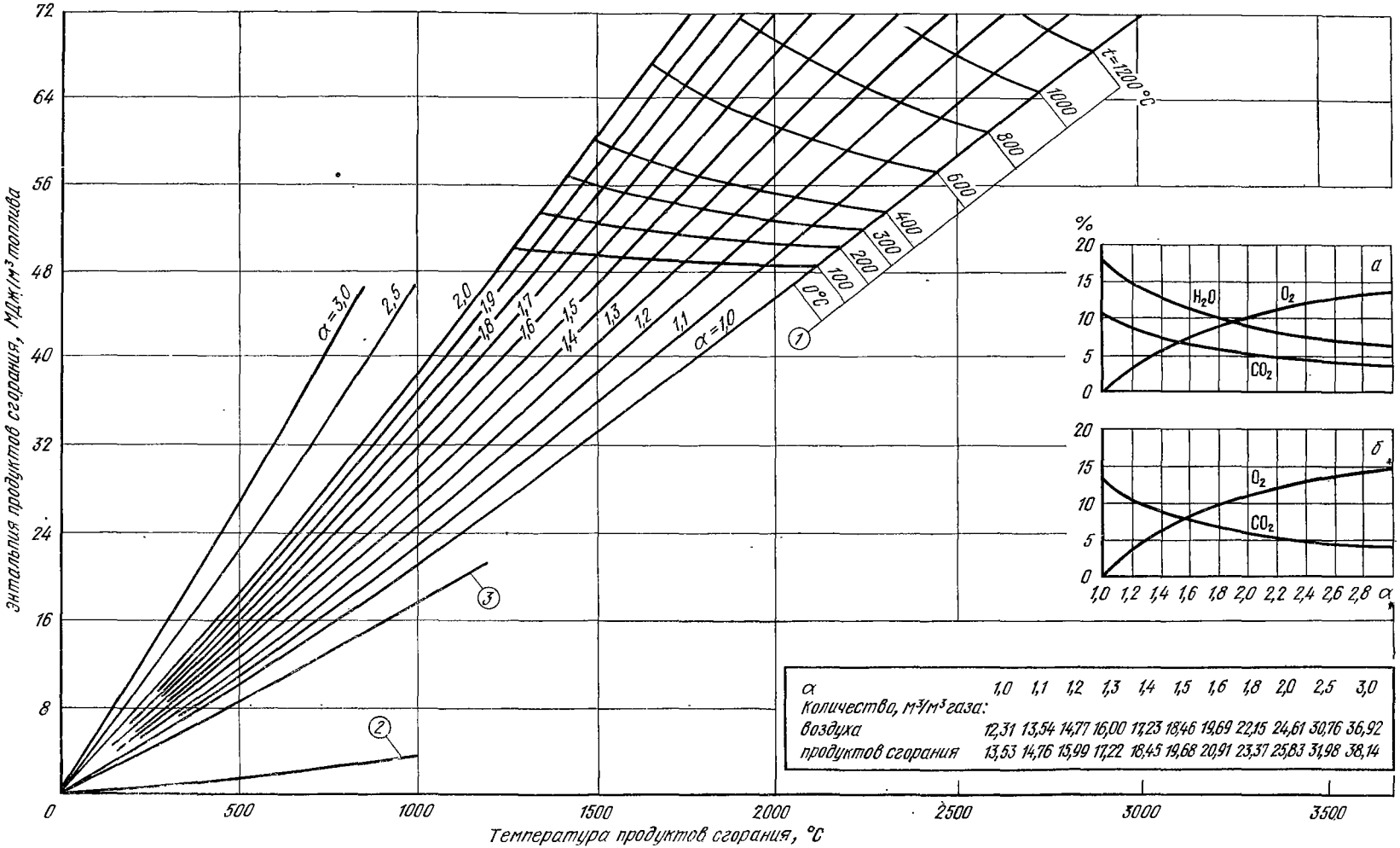
Для основного расчета теплообмена наиболее подходящими являются граничные условия третьего рода.

Температуру средства нагрева или охлаждения можно задавать выбором и изменением его характеристики (см. табл. 1).



α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
воздуха	11,25	12,37	13,49	14,62	15,74	16,87	17,99	20,24	22,49	28,11	33,74
продуктов сгорания	12,40	13,52	14,65	15,77	16,89	18,02	19,04	21,39	23,64	29,26	34,89

Рис. II.34. Расчет сгорания попутного нефтяного газа $Q_н^р$=42,5 МДж/м³:
а — состав влажных продуктов сгорания; *б* — то же, сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α=1,0



α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
воздуха	12,31	13,54	14,77	16,00	17,23	18,46	19,69	22,15	24,61	30,76	36,92
продуктов сгорания	13,53	14,76	15,99	17,22	18,45	19,68	20,91	23,37	25,83	31,98	38,14

Рис. II.35. Расчет сгорания попутного нефтяного газа $Q_{н}^{р}$=46,7 МДж/м³:

а — состав влажных продуктов сгорания; *б* — то же, сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α=1,0

Законы лучистого и конвективного теплообмена между средством нагрева или охлаждения и поверхностью известны (см. 13.1 и 13.2).

Следует отметить, что температура средства нагрева или охлаждения (продуктов сгорания, радиационных труб, воздуха и т. д.), отличается от температуры, показываемой термопарой или пирометром, установленными в рабочем пространстве печи. Рабочий спай термопары, например, «видит» все тела, участвующие в теплообмене, и поэтому температура термопары есть средняя между температурами этих тел. Причем температура термопары существенно зависит от места ее установки, близости к тому или иному телу, экранированности от других тел, воздействия на нее конвективных газовых потоков и факела. Поэтому температура термопары является в значительной степени экспериментальной величиной, точное значение и характер изменения которой устанавливаются в процессе наладки печи.

5. Аналитические решения уравнения теплопроводности при граничных условиях третьего рода известны для тел простой формы (пластина, цилиндр) и их пересечения при постоянных коэффициенте теплоотдачи и теплофизических свойствах тела в случаях, указанных в табл. 2.

Все решения, представленные в виде критериальных зависимостей, приведены для тонких тел в разд. 13.3.5, а для массивных тел простой формы в разд. 13.3.6. На рис. I.23—I.54 даны графики, позволяющие определить значения функций, входящих в решение.

При решении двухмерных задач применяют методы перемножения температурных полей (для сложных тел, образованных пересечением тел простой формы) или сложения температурных полей (при действии местных источников или стоков тепла). Методы решения двухмерных задач описаны в разд. 13.3.7—13.3.10.

Исходя из условий, для которых получены аналитические решения и построены графики, позволяющие производить инженерные расчеты, перед проведением таких расчетов необходимо следующее: 1) представить нагреваемый или охлаждаемый металл как тело простой формы: пластину, цилиндр или их пересечение; 2) представить температуру средств нагрева или охлаждения как постоянную или линейно меняющуюся во времени; 3) усреднить теплофизические свойства нагреваемого или охлаждаемого металла; 4) определить коэффициенты теплоотдачи для соответствующего закона теплоотдачи (для тонких тел — в зависимости от того, какой вид теплоотдачи превалирует, для массивных тел — по конвективному закону теплоотдачи; метод определения — см. 13.3.4); 5) усреднить коэффициенты теплоотдачи в процессе нагрева или охлаждения.

В случае, если изменение температуры средств нагрева или охлаждения имеет сложный характер, а также для увеличения точности расчета график изменения температуры разбивают на расчетные участки. В каждом из них температуру средств нагрева или охлаждения принимают постоянной или линейно меняющейся во времени.

При расчете по участкам конечное температурное состояние металла на предыдущем участке будет начальным для последующего участка. Если конечное температурное состояние металла является неравномерным, то для расчета последующего участка температуру считают распределенной по параболическому закону.

Усреднение теплофизических свойств и коэффициентов теплоотдачи можно производить по участкам.

Во всех расчетах пренебрегают влиянием химических процессов (окисление, обезуглероживание и т. д.), а тела, участвующие в теплообмене, считают серыми и диффузными.

В непрерывных печах пренебрегают изменением температур средств нагрева или охлаждения по ширине печи и распространением тепла вдоль печи по металлу или элементам печи.

6. В последние годы получили распространение расчеты теплопередачи в печах методом конечных разностей с помощью ЭВМ. Основные положения и методы расчета теплопередачи с помощью ЭВМ изложены в специальной литературе. При расчете методом конечных разностей получают более точные результаты, так как нет надобности накладывать такие строгие ограничения на характер изменения температуры средств нагрева или охлаждения, на начальную температуру тела и его форму, не требуется принимать постоянными свойства металла и коэффициенты теплоотдачи.

Для расчета на ЭВМ необходима разработка математической модели теплопередачи и соответствующей программы. Собственно время машинного счета нагрева или охлаждения металла невелико, однако подготовительная работа по созданию, вводу и отладке сложных и громоздких математических моделей теплопередачи занимает значительное время. Если же необходимо изменение какого-либо входного параметра, вариация которого в математической модели не предусмотрена, то требуется создание, отладка и адаптация новой программы, а это чрезвычайно большая работа.

ТАБЛИЦА 2. СЛУЧАИ, ДЛЯ КОТОРЫХ ИЗВЕСТНЫ АНАЛИТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТРЕТЬЕГО РОДА

Массивность тела	Закон теплоотдачи на поверхность тела	Температура средства нагрева или охлаждения	Начальная температура тела
Тонкое тело	Лучистый Конвективный Смешанный	Постоянная	Равномерная
Массивное тело	Конвективный	Постоянная	Равномерная
			Распределенная по параболическому закону
		Линейно меняющаяся во времени	Равномерная
			Распределенная по параболическому закону

Большинство металлургических печей являются индивидуальными агрегатами, поэтому общие затраты времени, труда и средств при расчетах на ЭВМ во многих случаях окажутся больше, чем при инженерных расчетах с помощью малых счетных машин. Кроме того, часто высокая точность, обеспечиваемая при расчете на ЭВМ, оказывается во многом бесполезной из-за неточности входной информации, которой располагает конструктор.

По этим причинам для большинства практических целей преимущественно выполняют расчеты с помощью инженерных аналитических методов и с применением малых счетных машин.

На современном этапе расчеты с применением ЭВМ можно рекомендовать в следующих случаях: 1) когда сложность технологии и условий нагрева или охлаждения не позволяет достаточно точно описать ее упрощенной схемой, которая принята для инженерного расчета (сложная конфигурация металла, неравномерный нагрев или охлаждение, учет химических процессов, нестационарные режимы и т. д.); 2) когда требуются многочисленные вариантные расчеты, обычно для решения задач оптимизации режимов работы или конструктивных элементов печи; 3) для управления режимом работы печей, когда требуется проводить большой объем расчетов в кратчайшее время.

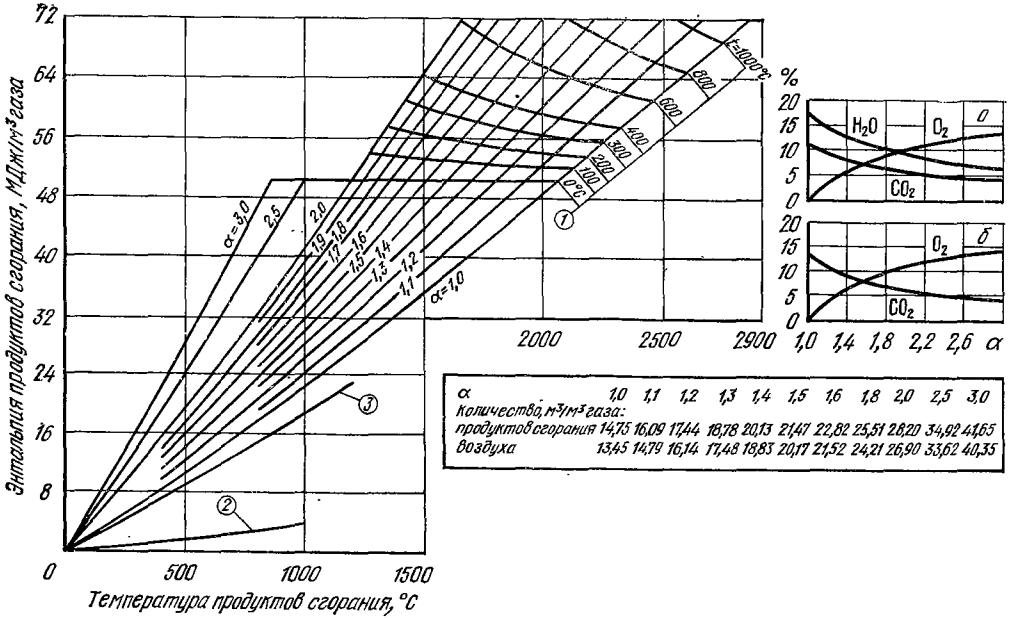


Рис. II.36. Расчет сгорания попутного нефтяного газа $Q^{р}_{н}$=51,1 МДж/м³:

а — состав влажных продуктов сгорания; *б* — то же, сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, ндущего на сжигание 1 м³ газа при α=1,0

Раздел первый

РАСЧЕТ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Глава 1

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

1.1. Назначение нагревательных печей

Нагревательные печи непрерывного действия предназначены для нагрева металла перед горячей обработкой давлением. В прокатном и трубопрокатном производстве черной металлургии основными типами нагревательных печей непрерывного действия являются толкательные печи, печи с шагающим подом и шагающими балками, кольцевые печи.

В этих печах обычно нагревают для сортовых станов прямоугольную (квадратную) заготовку и блюмы толщиной 60—400 мм, шириной 60—400 мм и длиной 1—12 м; для листовых станов — слябы толщиной 90—350 мм, шириной 400—2000 мм и длиной 1—12 м; для прокатки труб — круглую заготовку и слитки диаметром от 40 до 600 мм и длиной 1—12 м, а также трубы и трубную заготовку.

1.2. Рекомендуемые температуры нагрева

Температура нагрева под прокатку зависит прежде всего от качества нагреваемого металла. Так, температура нагрева легированных и качественных сталей 1060—1200 °С, рядовых сталей 1200—1250 °С, металла непрерывной разливки 1250—1280 °С, трансформаторной стали при сульфидном варианте 1280—1300 °С. Для легированных и качественных сталей температуры нагрева под прокатку в соответствии с технологическими инструкциями металлургических заводов Советского Союза приведены в табл. 1.1.

Значение температуры нагрева для каждого конкретного случая задается в зависимости от технологии прокатки, характеристики стана, величины обжатия, расстояния от печи до стана. Так, при прокатке на листовых станах требуется температура нагрева на 25—30 °С выше, чем при прокатке на сортовых станах.

Конечный перепад температур по сечению также зависит от вида металла и условий его прокатки и должен задаваться технологами. Для прикидочных расчетов принимают перепад температур в металле порядка 15—20 °С на 100 мм расчетной толщины нагреваемого металла.

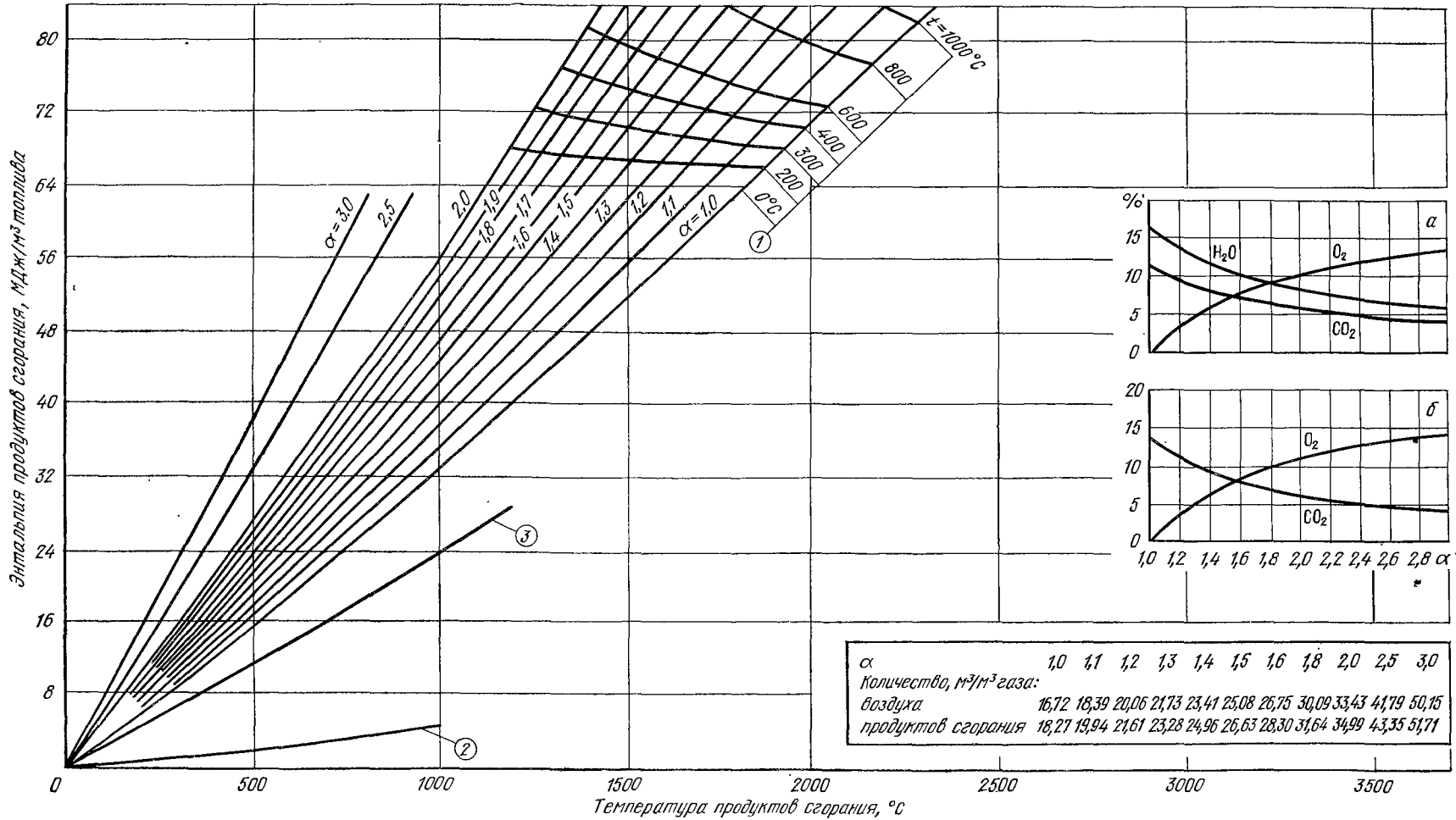
1.3. Особенности учета конвекции

Для выполнения технологических требований в нагревательных печах непрерывного действия осуществляют высокотемпературный нагрев металла в продуктах сгорания топлива при температуре газов в конечных зонах нагрева до 1300—1400 °С.

При высоких температурах теплопередача к металлу происходит в основном излучением, а доля конвекции составляет 2—10 %. Причем из-за сложного профиля печи, неравномерности температур, особенностей укладки металла, действия сожигательных устройств движение газов в печи носит чрезвычайно сложный характер и определение коэффициентов конвективной теплоотдачи представляет большую трудность. Поэтому часто теплоотдачу конвек-

ТАБЛИЦА 1.1. ТЕМПЕРАТУРА НАГРЕВА ПОД ПРОКАТКУ ЛЕГИРОВАННЫХ И КАЧЕСТВЕННЫХ СТАЛЕЙ

Марка стали или сплава	Температура нагрева, °С
У12, У13, У12А, 60ХГ, 95Х18, 12МХ, Х12М	1060—1120
70—85, 65Г, 70Г, У7—У10, У7А, У8ГА, У10А, Х, 13Х, 7Х3, ХВГ, 4ХВ2С, 5ХВ2С, 15Х12ВНМФ, 18Х2Н4МА, 5ХНМ, 15Х5М, 9ХС, ЕХ3, ШХ4, ШХ15, ШХ15СГ, 20Х13Н4Г9 (ЭИ100), 13Х11Н2В2МФ (ЭИ961), 09Х16Н4Б (ЭП56), 25Х13Н2 (ЭИ474), 20Х17Н2, 15Х5М	1120—1160
А12—А35, А40Г, 45—65, 40Г—60Г, 50Г2, 09Г2, 09Г2С, 25Г2С, 12ГС, 35ГС, 55ГС, Р9, Р18, 55С2, 60С2, 60С2Н2А, 60С2ХА, 9Х1, 50Х, 08Х13, 12Х13, 20Х13, 30Х13, 40Х13, 18ХГ, 30ХГСА, 35ХГСА, 18ХГТ, Х03ГТ, 15ХМ—38ХМ, 30ХМА, 15Х5М, 38ХМЮА, 20ХН—50ХН, 12ХН2, 12ХН3А, 20ХН3А, 30ХН3А, 12Х2Н4А, 20Х2Н4А, 40ХН2МА, 04Х18Н10, 12Х18Н9, 12Х18Н9Т, 17Х18Н9, 08Х18Н10, 08Х18Н10Т, Х15Н60, Х20Н80, Х25Н20, 20Х23Н13, 36Х18Н25С2, 20Х25Н20С2, 40ХС, 16ХСН, 40Х10С2М, 9ХФ, 15ХФ, 40ХФА, 30Х3МФ, 45Х14Н14В2М (ЭИ69), 20Х20Н14С2, (ЭИ211), 95Х18 (Х18, ЭИ229), 20Х17Н2 (ЭИ268), 20Х23Н13 (ЭИ319), 0Х18Н12Б (ЭИ402), 20Х3МВФ (ЭИ415), 20Х23Н18 (ЭИ417), 15Х6СЮ (ЭИ428), 10Х17Н13М3Т (ЭИ432), ХН78Т (ЭИ435), ХН77ТЮР (ЭИ437Б), 10Х17Н13М2Т (ЭИ448), 37Х12Н8Г8МФБ (ЭИ481), ХН75МБТЮ (ЭИ602), 06ХН28МТ, 0Х23Н28М2Т (ЭИ628), ХН70Ю (ЭИ652), 09Х14Н16Б (ЭИ694), 09Х14Н18В2БР (ЭИ695Р), ХН38ВТ (ЭИ703), 10Х14Г14Н4Т (ЭИ711), 12Х2НВФА (ЭИ712), 12Х25Н16Г7АР (ЭИ835), ХН60ВТ (ЭИ868), 12Х17Г9АН4 (ЭИ878), 09Х15Н8Ю (ЭИ904), 08Х17Н5М3 (ЭИ925), 11Х11Н2В2МФ (ЭИ962), 08Х22Н6Т (ЭП53), 08Х21Н6М2Т (ЭП54), 15Х17АГ14 (ЭП213), 07Х21Г7АН5	1160—1200
05—40, 15Г—40Г, 10ХСНД, 15ХСНД, Л53, 20ХГСА, 09Г2, 10Г2—45Г2, 15Х—40Х	1200—1250



α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
воздуха	16,72	18,39	20,06	21,73	23,41	25,08	26,75	30,09	33,43	41,79	50,15
продуктов сгорания	18,27	19,94	21,61	23,28	24,96	26,63	28,30	31,64	34,99	43,35	51,71

Рис. II.37. Расчет сгорания попутного нефтяного газа $Q_{н}^{р}$=63,85 МДж/м³:

а — состав влажных продуктов сгорания; *б* — то же, сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α=1,0

дией не рассчитывают, учитывая ее поправочным коэффициентом к коэффициенту теплоотдачи излученнем или принимая ее в запас на возможную неточность расчета.

1.4. Двухзонный и трехзонный теплотехнические режимы нагрева металла

Различают двухзонный и трехзонный теплотехнические режимы нагрева металла в нагревательных печах (рис. 1.1). При двухзонном режиме имеются две теплотехнические зоны по ходу металла (по мере нагрева): методическая, в которой температура повышается, и сварочная с постоянной высокой температурой. Обычно методическая зона соответствует неотапли-

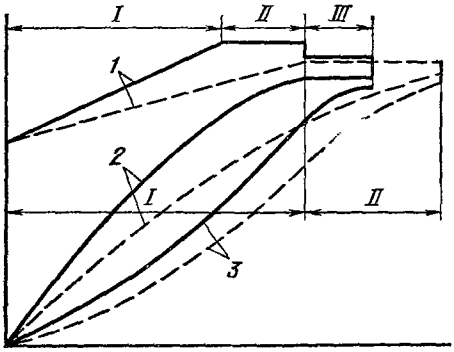


Рис. 1.1. Принципиальное распределение температур продуктов сгорания и металла при двухзонном (— — —) и трехзонном (————) режимах нагрева: *1* — температура продуктов сгорания; *2* и *3* — температура поверхности и центра металла; теплотехнические зоны: *I* — методическая; *II* — сварочная; *III* — томильная

ваемой зоне в печи, в которой происходит утилизация тепла продуктов сгорания, а сварочная — отапливаемой зоне, зоне горения или зоне высокотемпературного факела. Однако методический режим может поддерживаться и в отапливаемой зоне путем соответствующего выбора тепловой мощности горелочных устройств, особенно в зонах с рассредоточенным отоплением (сводовым, боковым).

При двухзонном режиме температура в сварочной зоне должна быть выбрана так, чтобы к моменту достижения заданной конечной температуры поверхности металла перепад температур по его сечению не превышал допускаемой величины. При этом чем меньший перепад необходимо получить, тем ближе должна быть температура сварочной зоны к заданной конечной температуре поверхности металла. Поэтому при двухзонном режиме интенсивность нагрева ограничена и, кроме того, нельзя допускать задержек металла в печи сверх необходимого времени нагрева во избежание перегрева металла.

При трехзонном режиме нагрева к методической и сварочной зонам добавляется третья теплотехническая зона по ходу металла (по мере нагрева) — томильная с постоянной температурой, близкой к заданной конечной температуре поверхности металла. Температура в сварочной зоне при трехзонном режиме нагрева может быть выше, а нагрев интенсивнее, чем при двухзонном режиме, так как возникающий при интенсивном нагреве больший перепад температур по сечению выравнивается в томильной зоне, куда металл попадает из сварочной зоны по достижении заданной температуры поверхности. Благодаря близости температур продуктов сгорания в томильной зоне и поверхности металла снижается опасность перегрева при задержке металла в печи. Применение трехзонного режима тем более целесообразно, чем толще нагреваемый металл и чем меньший перепад по его сечению требуется получить.

Зоны отопления (регулирования) в печи могут не совпадать с теплотехническими зонами. Так, сварочная зона часто состоит из нескольких зон отопления. На печи такие зоны нумеруют по ходу движения металла: 1-я сварочная зона, 2-я сварочная зона и т. д. Однако в первых по ходу металла сварочных зонах часто наблюдается повышение температуры продуктов сгорания, т. е. теплотехнически они являются частью методической зоны. В то время как зоны отопления неизменны по величине и определяются конструкцией печи, теплотехнические зоны изменяются при изменении режима работы печи, их границы подвижны, они могут переходить одна в другую, например томильная и методическая — в сварочную, и наоборот.

1.5. Выбор расчетных участков

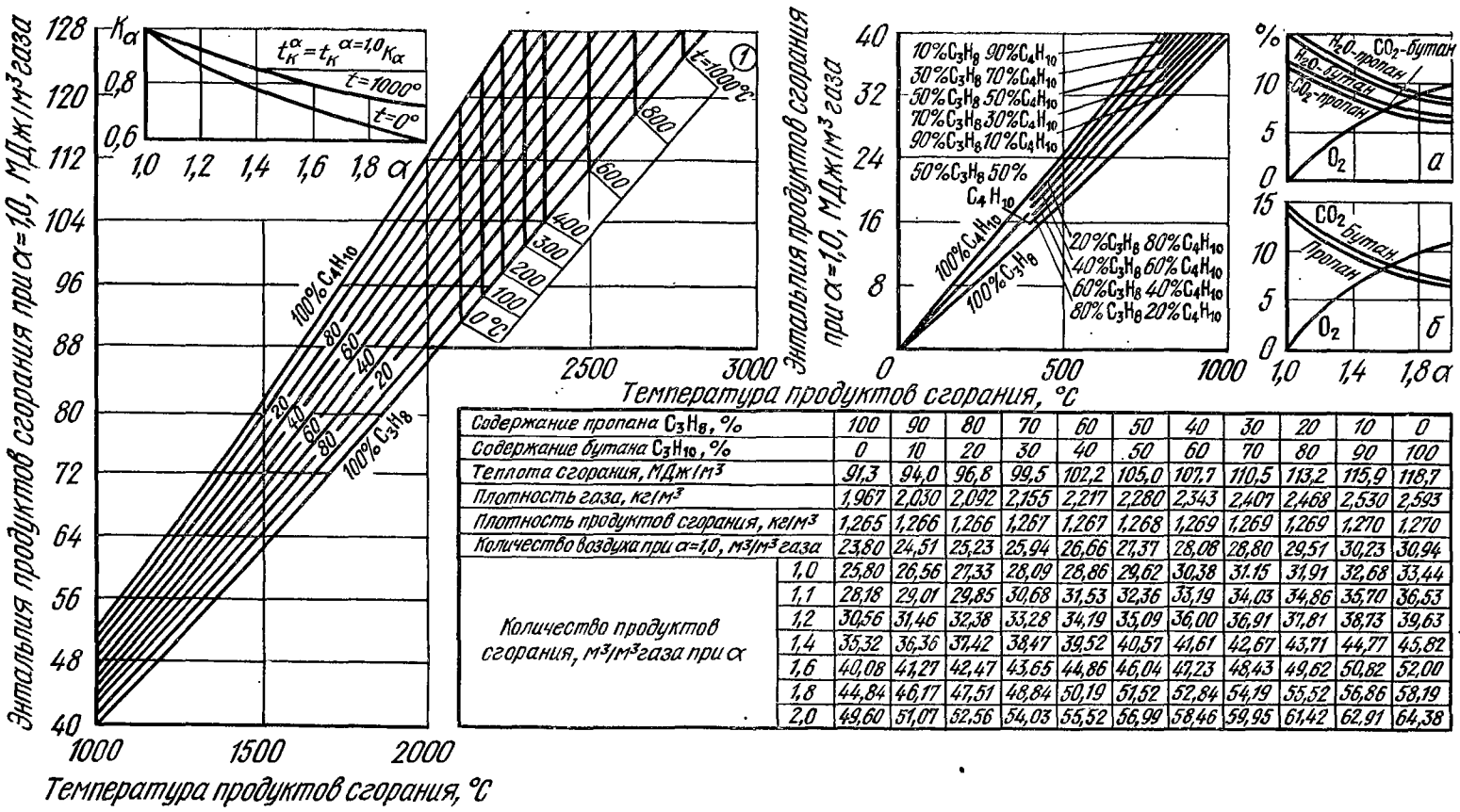
При разбивке печи на расчетные участки следует иметь в виду, что их границы обязательно должны совпадать с границами теплотехнических зон. Это вытекает из условий, для которых получены аналитические решения (см. табл. 2 введения). Для повышения точности расчетов теплотехнические зоны можно разбивать на несколько расчетных участков, при этом желательно совмещать такие участки с зонами отопления (регулирования), так как это упрощает дальнейшие расчеты размеров печи, тепловых мощностей зон и т. д.

При определении числа расчетных участков следует также учитывать, что на участках с постоянной температурой расчет дает более точные результаты, чем на участках с линейно изменяющейся температурой. На таких участках точность расчета тем выше, чем меньше изменение температуры продуктов сгорания. Поэтому зоны с существенным изменением температуры продуктов сгорания следует разбивать на большее число расчетных участков.

1.6. Температуры газов, кладки и удельное время нагрева

Исходя из общих принципов расчета нагрева металла (см. разд. 2 введения), на каждом расчетном участке нагревательной печи должны быть известны температура продуктов сгорания, начальное температурное состояние металла и продолжительность нагрева.

Температуру продуктов сгорания в сварочной зоне принимают на 80—130 °С, а в томильной на 30—50 °С выше заданной конечной температуры поверхности металла. Повышение температуры продуктов сгорания свыше 1350—1400 °С нежелательно, так как приводит к увеличению окисления и обезуглероживания металла и уменьшению стойкости огнеупоров и элементов печи. Рекомендуемые значения тем-



Содержание пропана C_3H_8, %		100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
Содержание бутана C_3H_{10}, %		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Теплота сгорания, МДж/м³		91,3	94,0	96,8	99,5	102,2	105,0	107,7	110,5	113,2	115,9	118,7
Плотность газа, кг/м³		1,967	2,030	2,092	2,155	2,217	2,280	2,343	2,401	2,468	2,530	2,593
Плотность продуктов сгорания, кг/м³		1,265	1,266	1,266	1,267	1,267	1,268	1,269	1,269	1,269	1,270	1,270
Количество воздуха при α=1,0, м³/м³ газа		23,80	24,51	25,23	25,94	26,66	27,37	28,08	28,80	29,51	30,23	30,94
Количество продуктов сгорания, м³/м³ газа при α	1,0	25,80	26,56	27,33	28,09	28,86	29,62	30,38	31.15	31,91	32,68	33,44
	1,1	28,18	29,01	29,85	30,68	31,53	32,36	33,19	34,03	34,86	35,70	36,53
	1,2	30,56	31,46	32,38	33,28	34,19	35,09	36,00	36,91	37,81	38,73	39,63
	1,4	35,32	36,36	37,42	38,47	39,52	40,57	41,61	42,67	43,71	44,77	45,82
	1,6	40,08	41,27	42,47	43,65	44,86	46,04	47,23	48,43	49,62	50,82	52,00
	1,8	44,84	46,17	47,51	48,84	50,19	51,52	52,84	54,19	55,52	56,86	58,19
	2,0	49,60	51,07	52,56	54,03	55,52	56,99	58,46	59,95	61,42	62,91	64,38

Рис. II.38. Расчет сгорания смеси пропана и бутана:
а — состав влажных продуктов сгорания; *б* — то же, сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха

пературы продуктов сгорания в зонах отопления нагревательной печи при нагреве рядовой стали приведены в табл. 1.2.

Для некоторых марок стали температуру продуктов сгорания в начале печи со стороны посада металла ограничивают, что обусловлено опасностью чрезмерно высоких температурных напряжений в металле. В табл. 1.3 даны максимальные температуры продуктов сгорания в начале печи, при которых допустим холодный посад некоторых марок сталей.

При расчете нагрева металла в печах, где слой продуктов сгорания имеет небольшую толщину (печи с роликовым подом, секционные), а также при косвенном радиационном нагреве (сводовое отопление) нагревающим телом может быть принята кладка. При выборе температуры кладки следует учитывать, что в зонах, где металл имеет высокую температуру, температура кладки близка к температуре продуктов сгорания, а в зонах, где металл еще холодный, температура кладки может быть ниже температуры продуктов сгорания на 100—150 °С. Зависимость между температурами продуктов сгорания и кладки дают формулы (13.22) и (13.23).

Начальное температурное состояние металла для каждого последующего участка принимают равным конечному температурному состоянию в предыдущей зоне, как указано в пункте 5 Введения.

Для предварительного определения продолжительности нагрева металла пользуются практическими данными. Общую продолжительность нагрева металла, ч, исходя из практических данных определяют по формуле

ТАБЛИЦА 1.2. ТЕМПЕРАТУРА ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ В ЗОНАХ ОТОПЛЕНИЯ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ ПРИ НАГРЕВЕ РЯДОВОЙ СТАЛИ

Число зон отопления	Участок печи	Температура в зоне при нагреве металла до температуры, °С	
		1200—1220	1230—1250
2	Томильная зона	1200—1260	—
	Сварочная зона	1300—1350	—
	Начало печи	800—1000	—
3	Томильная зона	1200—1260	1260—1320
	Сварочная верхняя зона	1300—1350	1320—1380
	Сварочная нижняя зона	1260—1300	1280—1320
	Начало печи	700—950	800—1000
4	Томильная зона	1200—1260	1260—1320
	Сварочная верхняя зона I	1220—1280	1260—1320
	Сварочная верхняя зона II	1300—1350	1320—1380
	Сварочная нижняя зона	1260—1300	1280—1320
	Начало печи	900—1050	950—1100
5	Томильная зона	1200—1260	1260—1320
	Сварочная верхняя зона I	1220—1280	1260—1320
	Сварочная верхняя зона II	1300—1350	1320—1380
	Сварочная нижняя зона I	1200—1240	1220—1260
	Сварочная нижняя зона II	1260—1300	1280—1320
	Начало печи	900—1050	950—1100

ТАБЛИЦА 1.3. МАКСИМАЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРА В НАЧАЛЕ ПЕЧИ, ПРИ КОТОРОЙ ДОПУСТИМ ХОЛОДНЫЙ ПОСАД

Марки стали	Температура, °С
30ХГТ, 20Х17Н2, 1Х13, 20Х13, 30Х13, 40Х13, 08Х18Н10, 08Х18Н10Т, 08Х13 (ЭИ496), 12Х18Н10Т, 12Х18Н12Т, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т, 20Х23Н18 (ЭИ417), 20Х13Н4Г9	800—900
35—60, 09Г2, 10Г2, 40—60, Г2, 15Г—70Г, 12ГС, 35ГС, 55ГС, 17ГС, 25Г2С, 40Х—50Х, 40ХФА, 18ХГ, 20ХГР, 35ХГ2, 30ХГС, 25ХГМ, 20ХГР—40ХГР, 30ХГТ, 40ХГТР, 20ХГСА—30ХГСА, 38Х2МЮА, Х12, 7Х3, 8Х3, 20ХН—50ХН, 30ХН3А, 12ХН3А, 20ХН3А, 20ХН4ФА, 5ХНВ, 12ХН2, 30ХН2МА, 20ХН2М, 5ХНМ, 38Х2Н2МА, 40ХН2МА, 38ХН3МФА, 30ХН2МФА, 45ХН2МФА, 20ХН4ФА, 25Х2М1Ф, 18Х2Н4МА, 15Х5М, 15Х5ВФ, 15Х5, 20Х3МВФ, 38Х2Ю, 14Х2Н3МА, 36Х2Н2МФА, 15Х5ВФ, 12Х1МФ, 12Х2Н4А, 20Х2Н4А, 15Н2М, 20Н2М, 12МХ, 20ХМ, 33ХС, 40ХС, 38ХС, 50С2, 55С2, 60С2, 70С3А, 60С2ХА, 70С2ХА, 60С2ХФА	700—800
70—85, У7—У13, У7А, У8ГА, У10, У12А, Х, 9Х1, 6ХВГ, 4ХВ2С—6ХВ2С, 38ХГН, 26ХГМ, ХГС, 35ХГСА, 30ХГСН2М, 38Х2МЮА, 5ХНВС, 8ХФ, 40ХС, Х12, Х12М, 12Х18Н9, 17Х18Н9, 12Х18Н9Т, 40Х10С2М, Х13Ю4, Х15Ю5, Х23Ю5, Р9, Р18, 60С2Н2А, 35ГС, ЕХ3, ШХ4, ШХ15, ШХ15СГ	600—700

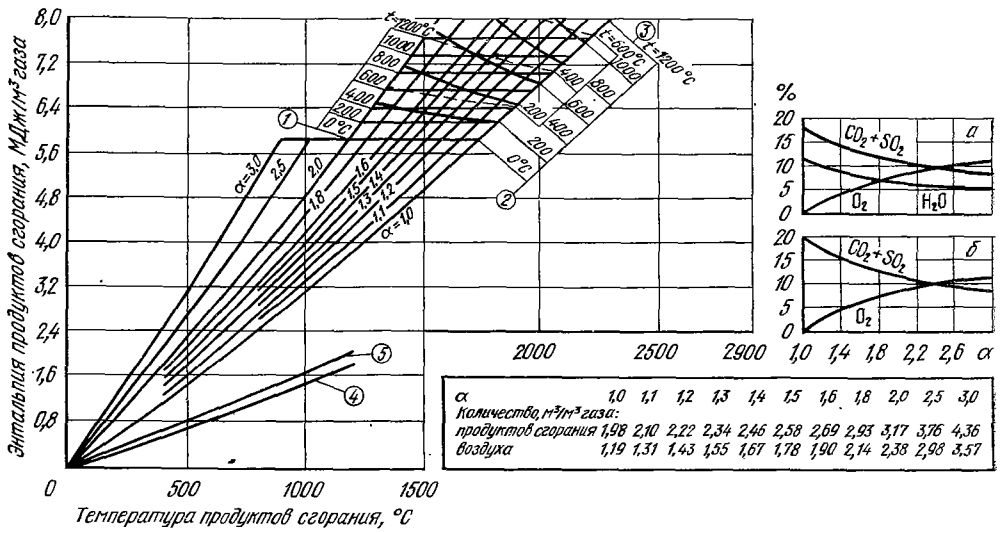


Рис. II.39. Расчет сгорания генераторного газа $Q^{\text{р}}_{\text{н}}$=5,8 МДж/м³:

а — состав влажных продуктов сгорания (0,02 % SO_2 при α=1,0); *б* — то же, сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева газа; *2* — то же, от подогрева воздуха; *3* — то же, от подогрева газа и воздуха до одинаковой температуры; *4* — энтальпия 1 м³ газа; *5* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α=1,0

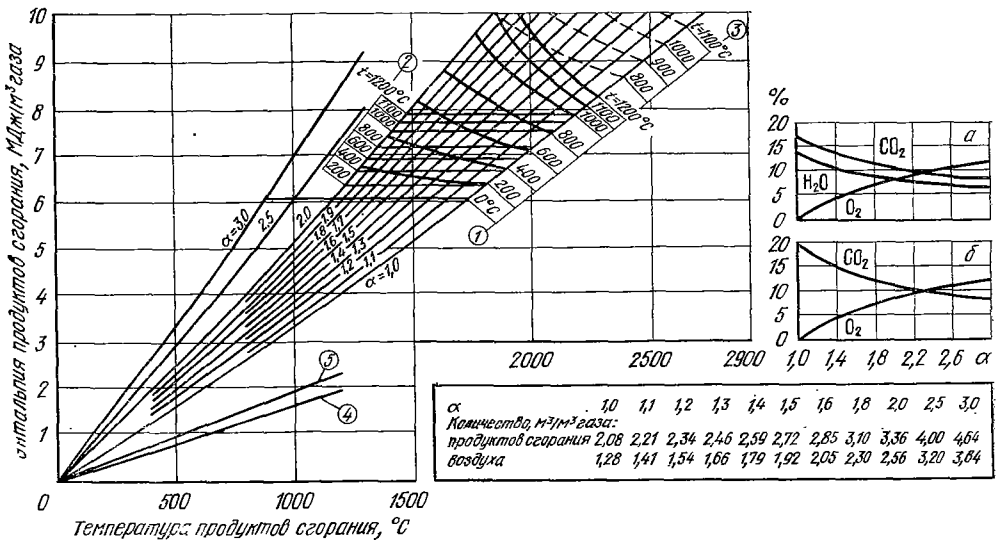


Рис. II.40. Расчет сгорания генераторного газа из торфа $Q^{\text{р}}_{\text{н}}$=6,1 МДж/м³:

а — состав влажных продуктов сгорания; *б* — то же, сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — то же, от подогрева газа; *3* — то же, от подогрева воздуха и газа до одинаковой температуры; *4* — энтальпия 1 м³ газа; *5* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α=1,0

ТАБЛИЦА 1.4. УДЕЛЬНОЕ ВРЕМЯ НАГРЕВА НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ В НЕПРЕРЫВНЫХ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ

Особенности нагрева	Тип печи	Толщина (диаметр) нагреваемого металла, м	Удельное время нагрева, мин/см
	Листовые станы		
Верхний и нижний обогрев слябов	Толкательные[1]	0,12—0,15	7,4
		0,155—0,25	8,0
		0,255—0,3	8,7
	С шагающими балками[1]	0,1—0,15	6,3
		0,155—0,25	6,6
		0,255—0,35	7,2
	Сортовые станы		
Верхний обогрев заготовок квадратного сечения	Толкательные[1]	0,08—0,115	9,0
	С шагающим подом[2]	0,08—0,115	4,5
		0,12—0,15	5,1
		0,155—0,2	5,7
Верхний и нижний обогрев заготовок квадратного сечения	Толкательные[1]	0,12—0,15	7,4
		0,155—0,25	8,0
		0,255—0,3	8,7
	С шагающими балками[3]	0,155—0,22	4,6
		0,225—0,3	5,0
	Трубопрокатные станы		
Верхний обогрев заготовок круглого сечения	Кольцевые[4]	0,1—0,15	5,5
		0,155—0,25	5,8
		0,255—0,3	6,1
		0,305 и более	6,4

[1] Коэффициент заполнения полезной длины печи 0,98.
[2] То же, 0,4.
[3] То же, 0,8.
[4] То же, 0,3—0,5.

ТАБЛИЦА 1.5. УДЕЛЬНОЕ ВРЕМЯ НАГРЕВА ЗАГОТОВОК РАЗЛИЧНЫХ МАРОК СТАЛИ В ТОЛКАТЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ ДВУХСТОРОННЕГО ОБОГРЕВА ДО ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОКАТКИ (ПО МАТЕРИАЛАМ ЗАВОДСКИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИНСТРУКЦИЙ)

Марки стали	Прокатные станы	Удельное время нагрева[1], мин/см
Низколегированные марганцовистые, кремнемарганцовые, хромокремнемарганцовые и др.: 15Г—30Г, 15Г1, 09Г2—45Г2, 09Г2Д, 12ГС—35ГС, 09Г2С—25Г2С, 10Г2С1, 10Г2С1Д, 17Г1С, 20ХГСА—35ХГСА, 10ХСНД—15ХСНД, 15Х—50Х, 18ХГ, 18ХГТ, 33ХС—40ХС, 20ХГР, 15ХМ—38ХМ, 30ХМА, 38ХМЮА, 14ХГН—19ХГН, 20ХГНМ, 12ХН2, 40ХН—50ХН, 50ХГА, 40ХГТР, 12Х1МФ, 12Х2НВФА, 12Х2НЧА, 50ХГФА, 4ХВ2С, 12ХН3А, 15ХГН2ТА, 20ХН2М, 50ХФА, 18ХНВА—25ХНВА, 40ХН2МА	Листовые Крупносортные Мелкосортные	$8,2+0,02S$ $6,0+0,13S$ 9,4
Высокоуглеродистые (рессорно-пружинные, инструментальные, шарикоподшипниковые): 60—85, 65Г—70Г, 55С2—60С2, 60С2А, 60С2Н2А, 60С2ХА, 60С2ХФА, 65С2ВА, 70С3А, 70С2ХА, 80С, У7—У13, У7А—У13А, У8ГА, ШХ4—ШХ15, ШХ15СГ—ШХ20СГ	Листовые Крупносортные Мелкосортные	$8,8+0,04S$ $5,4+0,18S$ $8,6+0,08S$
Хромистые нержавеющие: 08Х13—40Х13, Х12, Х12М, Х12Ф1, Х12ВМ, 10Х13Ю, 12Х17, 14Х17Н2, 15Х5ВФ, 3Х2В8Ф, Х6ВФ, 15Х5, 15Х5М, 4Х5МФС, 08Х17Т, 20Х17Н2, 15Х25Т, 15Х28, 40Х9С2, 40Х10С2М	Листовые Крупносортные Мелкосортные	$6,4+0,38S$ 12,5 $8,8+0,24S$

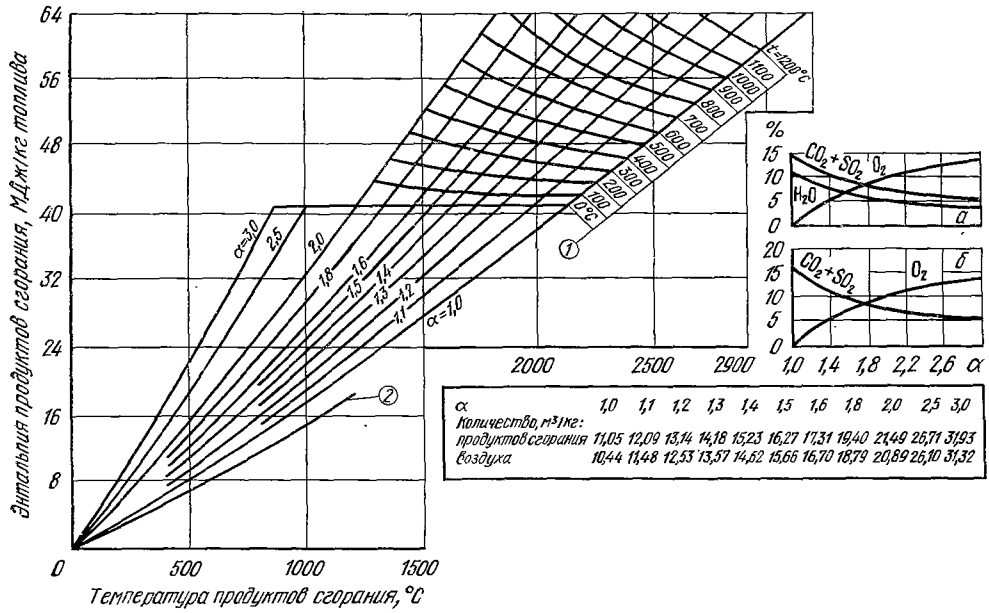


Рис. II.41. Расчет сгорания мазута (марка «100») $Q^{р}_{н}$=39,65 МДж/м³: распыливание воздухом.

а — состав влажных продуктов сгорания (0,04 % SO_2 при α=1,0); *б* — то же, сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 кг мазута при α=1,0

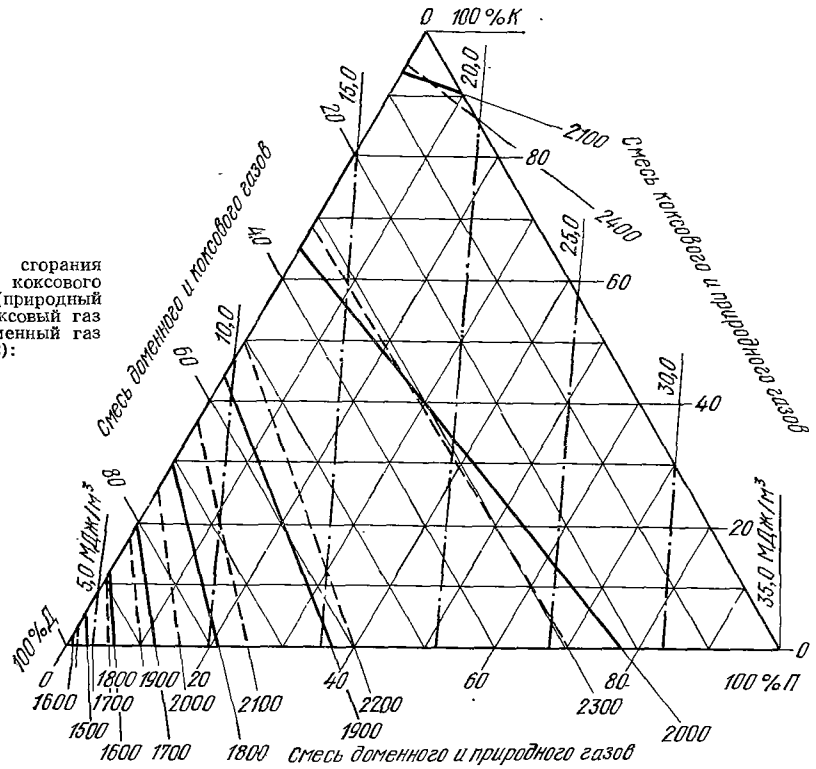


Рис. II.42. Расчет сгорания смесей природного, коксового и доменного газов (природный газ см. рис. II.6, коксовый газ см. рис. II.4 и доменный газ см. рис. II.2):

Газ	Теплота сгорания, МДж/м³	Калориметрическая температура сгорания	
		воздух и газ холодные	воздух 500 °С, газ холодный
Доменный Д	3,72	1407	1573
Коксовый К	17,10	2113	2420
Природный П	35,0	2030	2350
Обозначение на графике	Штрих-пунктирные	Сплошные жирные	Штриховые

Продолжение табл. 1.5

Марки стали	Прокатные станы	Удельное время нагрева[1], мин/см
Хромоникелевые нержавеющие: 12Х18Н2Т, 12Х18Н9, 12Х18Н9Т, 17Х18Н9, 04Х18Н10, 08Х18Н10, 08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т, 03Х18Н11, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т, 08Х22Н6Т, 08Х21Н6М2Т, 10Х23Н18, 20Х23Н18, 08Х16Н11М3, 55Х20Г9АН, 07Х16Н6, 09Х16Н4Б, 20Х17Н2, ХН38Т, ХН78Т, 45Х14Н14В2М, 37Х12Н8Г8МФБ, 12Х18Н10Е	Листовые Крупносортные Мелкосортные	8,3+0,42S 14 9,7+0,33S
Сложнолегированные хромоникелевые: 08Х16Н13М2Б, 06ХН28МДТ, 03Х21Н21М4ГБ	Мелкосортные	15
Высоколегированные инструментальные (быстрорежущие): Р9, Р12, Р18, Р9К10, Р6М5, Р18Ф	Листовые	17,5

Примечания: 1. При нагреве заготовок с зазором в печах с шагающим подом сортовых станов и в кольцевых печах трубопрокатных станов удельное время нагрева следует принимать по отношению к нагреву низкоуглеродистых марок стали (см. табл. 1.4): для низколегированных марок стали — одинаковым; для среднелегированных — на 10—12 % больше; для легированных — на 30 % больше.

2. Марки стали сгруппированы по времени нагрева при одинаковых условиях.

3. К листовым станам отнесены толсто- и среднелистовые, универсальные, полосовые, широкополосные (тонколистовые); к крупносортным — еще и рельсобалочные, заготовочные и трубозаготовочные; к мелкосортным — еще и среднесортные и проволочные станы.

[1] S — полная толщина заготовки, см.

$$\tau = zS/0{,}6, \qquad (1.1)$$

где S — толщина нагреваемого металла, м; z — удельное время нагрева, мин/см. Практические данные об удельном времени нагрева в зависимости от типа нагревательной печи, марки стали и толщины нагреваемого металла приведены в табл. 1.4 и 1.5.

1.7. Расчетная часовая производительность и садка печей

Для расчета размеров печи или группы печей необходимо знать их часовую производительность, которую при нагреве данного вида металла принимают равной заданной часовой производительности стана (в пересчете на всад) при прокатке этого вида металла.

По расчетной часовой производительности и рассчитанной продолжительности нагрева данного вида металла определяют садку печи или группы печей, т:

$$G = P\tau, \qquad (1.2)$$

где P — расчетная часовая производительность, т/ч; τ — продолжительность нагрева, ч.

Если в печи нагревают различные по размерам и свойствам виды металла, то для каждого из них рассчитывают продолжительность нагрева, а затем садку печи или группы печей, и из полученных значений выбирают максимальную садку. По этой максимальной садке рассчитывают в дальнейшем длину полезного пода печи или группы печей.

1.8. Длина полезного пода, ширина рабочего пространства, площадь и напряжение пода

Длина полезного пода печи — это часть общей длины печи, по которой происходит перемещение металла. В нагревательных печах непрерывного действия перемещение металла происходит, как правило, поперек его оси, В этом случае длина полезного пода печи или группы печей

$$L_{\text{п}} = Gb/nMk_{\text{з}}, \qquad (1.3)$$

где $L_{\text{п}}$ — длина полезного пода, м; b — ширина заготовки, м; n — число рядов заготовок в печи; M — масса заготовки, т; $k_{\text{з}}$ — коэффициент заполнения полезной длины печи.

Для прямоугольных заготовок формулу (1.3) можно записать в виде

$$L_{\text{п}} = G/nSl\rho k_{\text{з}}, \qquad (1.4)$$

где S — толщина заготовки, м; l — длина заготовки, м; ρ — плотность металла, т/м³; плотность обычной углеродистой стали составляет кг/м³ (т/м³): катаной 7850 (7,85), непрерывнолитой спокойной 7800 (7,8), непрерывно-литой кипящей 7200 (7,2), в штучных слитках 6800—7000 (6,8—7,0).

Ширину рабочего пространства (ширина печи в свету) принимают в зависимости от длины нагреваемых заготовок l и числа рядов заготовок в печи n. Расстояние от концов заготовок до стен печи, а также зазор между концами заготовок в рядах принимают равным 0,2—0,4 м. Таким образом, ширина печи, м:

$$B = nl + (n + 1)(0{,}2 \div 0{,}4). \qquad (1.5)$$

Площадь габаритного пода, м², определяют как произведение длины габаритного пода на ширину печи в свету:

$$F_{\text{г}} = L_{\text{г}}B. \qquad (1.6)$$

Площадь активного пода представляет площадь, покрытую металлом в рабочем пространстве печи, и определяется как произведение длины полезного пода, занятой металлом, на длину нагреваемых заготовок. При многорядном нагреве берется суммарная длина загото-

ТАБЛИЦА II.1. ПЕРЕЧЕНЬ РИСУНКОВ ДЛЯ РАСЧЕТА ПОЛНОГО СГОРАНИЯ ТОПЛИВА В ВОЗДУХЕ

Топливо*	$^{r}Q^{и}_{р}$, МДж/м³		$q_г$, кг/м³		$q_д$, кг/м³, при $\alpha=1{,}0$	Состав топлива, % (объеми.)												Рисунок
	влажиого	сухого	влажного	сухого		CO	H_2	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12}	C_mH_n	CO_2	O_2	N_2	H_2O	
Д	3,35	3,43	1,34	1,34	1,43	25,3	0,90	0,12	—	—	—	—	—	14,1	0,18	57,1	2,3	II.1
	3,72	3,80	0,30	1,31	1,42	26,6	2,40	0,30	—	—	—	—	—	12,0	—	56,4	2,3	II.2
	4,10	4,19	1,29	1,30	1,42	30,1	2,20	0,10	—	—	—	—	—	10,2	—	55,1	2,3	II.3
К	17,1	17,5	0,48	0,47	1,20	6,4	55,5	24,6	—	—	—	—	2,00	2,00	0,80	6,4	2,3	II.4
П	34,0	34,2	0,82	0,82	1,24	—	—	84,12	0,99	0,50	0,05	—	—	—	—	9,92	0,8	II.5**
	35,0	35,1	0,77	0,77	1,23	—	—	92,30	0,70	0,50	0,50	0,20	—	—	—	5,30	0,5	II.6
	35,6	35,7	0,83	0,83	1,24	—	—	88,37	2,72	0,92	0,74	0,31	—	4,39	—	2,05	0,5	II.7
	36,5	36,8	0,78	0,78	1,24	—	—	92,26	2,98	0,69	0,47	0,23	—	0,07	—	2,50	0,8	II.8
	37,2	37,5	0,78	0,78	1,24	—	—	91,95	3,87	1,29	0,40	0,11	—	0,12	—	1,46	0,8	II.9
	—	38,1	—	0,80	1,24	—	—	90,90	5,00	1,50	0,74	0,05	—	0,60	—	1,21	—	II.10
ДК	5,05	5,17	1,22	1,23	1,36	24,6	7,60	2,70	—	—	—	—	0,20	11,0	0,10	51,5	2,3	II.11
	5,85	6,00	1,17	1,17	1,34	23,4	10,9	4,20	—	—	—	—	0,30	10,4	0,10	48,4	2,3	II.12
	6,65	6,82	1,12	1,12	1,32	22,1	14,2	5,70	—	—	—	—	0,40	9,80	0,20	45,3	2,3	II.13
	7,55	7,73	1,07	1,07	1,30	20,8	17,5	7,20	—	—	—	—	0,60	9,20	0,20	42,2	2,3	II.14
	8,40	8,60	1,01	1,01	1,28	19,6	20,9	8,80	—	—	—	—	0,70	9,50	0,30	38,9	2,3	II.15
	9,20	9,42	0,96	0,96	1,27	18,3	24,2	10,30	—	—	—	—	0,80	7,90	0,30	35,9	2,3	II.16
	10,1	10,3	0,91	0,91	1,26	17,0	27,5	11,80	—	—	—	—	1,00	7,30	0,40	32,7	2,3	II.17
	10,9	11,15	0,86	0,86	1,25	15,8	30,9	13,30	—	—	—	—	1,10	6,60	0,40	29,6	2,3	II.18
	11,7	12,0	0,81	0,78	1,24	14,5	34,2	14,90	—	—	—	—	1,20	6,00	0,50	26,4	2,3	II.19
	12,5	12,8	0,76	0,76	1,23	13,2	37,6	16,40	—	—	—	—	1,30	5,40	0,50	23,3	2,3	II.20
	14,6	15,0	0,63	0,63	1,22	10,1	45,9	80,20	—	—	—	—	1,60	3,80	0,60	15,5	2,3	II.21

вок во всех рядах. Следовательно, площадь активного пода, м²:

$$F_а = k_з L_п l n. \quad (1.7)$$

Напряжение активного пода, кг/м²·ч, представляет удельную производительность и определяется по формуле

$$H_а = 1000P/F_а. \quad (1.8)$$

Эта величина характеризует интенсивность работы печи. Иногда определяют также напряжение габаритного пода

$$H_г = 1000P/F_г. \quad (1.9)$$

Эта величина характеризует использование пода печи.

Высоту рабочего пространства принимают по практическим данным.

1.9. Тепловая мощность печи и удельный расход тепла

Тепловой баланс печи и отдельных зон нагрева составляют по методике, приведенной в гл. 15.

При составлении тепловых балансов участков нагрева (зон печи) необходимо учитывать переток продуктов сгорания из одной зоны в другую по методике, изложенной в разд. 15.4.

Из теплового баланса печи, составленного при расчетной производительности, определяют тепловую мощность печи, которую закладывают в проект.

Из тепловых балансов зон, составленных при расчетной производительности, определяют расчетную тепловую мощность зон. Тепловую мощность каждой зоны увеличивают на 10 % по сравнению с расчетной, что необходимо для обеспечения возможности перераспределения подачи топлива по зонам в процессе эксплуатации.

По тепловой мощности печи и отдельных зон отопления определяют максимальные расходы топлива на печь и на каждую зону отопления, а по ним рассчитывают сожигательные устройства, а также все трассы и устройства для подачи топлива, воздуха и удаления продуктов сгорания.

Для определения потребления тепла печью составляют тепловой баланс для соответствующей производительности печи при нагреве металла определенных параметров.

По рассчитанному потреблению тепла печью определяют удельный расход тепла, кДж/кг, при данных условиях работы печи по формуле

$$q = 3{,}6Q_{потр}/P, \quad (1.10)$$

где $Q_{потр}$ — потребление тепла печью, кВт; P — производительность печи, т/ч.

1.10. Работа печи при иерасчетных условиях

Размеры печи определяют при максимальной садке и по расчетной производительности для данного вида металла, который назовем расчетным. Однако печь данных размеров может работать при различной производительности в зависимости от условий работы стана. Садка печи также может меняться в зависимости от размеров и свойств нагреваемого металла. При этом изменяются характеристики и показатели печи (температурный режим, потребление тепла, напряжение пода).

В практике проектирования обычно встречаются три типа задач расчета печи с заданными размерами: 1) определение температурного режима при нагреве расчетного металла с пониженной производительностью; 2) определение температурного режима при нагреве металла, отличающегося от расчетного размерами и (или) свойствами, если задана производительность стана при прокатке этого вида металла; 3) определение максимальной производительности при поверочном расчете или пересчете существующей печи данных размеров.

В первой задаче прежде всего из формулы (1.2) по известной садке печи и производительности определяют продолжительность нагрева, ч:

$$\tau = G/P. \quad (1.11)$$

Далее, задавшись новым распределением температур по длине печи, следует произвести расчет нагрева металла, добиваясь получения необходимого конечного температурного состояния металла.

Следует учесть, что при существенном снижении производительности целесообразно переходить с трехзонного на двухзонный режим нагрева путем снижения температуры продуктов сгорания в сварочной зоне до температуры продуктов сгорания в томильной зоне или еще ниже. При этом поверхность металла будет меньшее время находиться при высоких температурах, поэтому снизится окисление и обезуглероживание металла.

Потребление тепла печью при новой производительности определяется из расчета теплового баланса.

Напряжение пода для печи данных размеров, как видно из формул (1.8) и (1.9), прямо пропорционально производительности.

Во второй задаче необходимо сначала определить садку печи, т, по известной длине полезного пода из формулы (1.3):

$$G = L_п n M k_з / b \quad (1.12)$$

или для прямоугольных заготовок — из формулы (1.4):

$$G = L_п n S l \rho k_з. \quad (1.13)$$

Для металла, отличающегося от расчетного только теплофизическими свойствами, садка печи не меняется.

Далее из формулы (1.1) по заданной производительности стана определяют расчетную производительность печи, а затем по формуле (1.11) по известной садке и производительности находят продолжительность нагрева. Дальнейший расчет производится так же, как и в первой задаче.

В третьей задаче следует сначала принять распределение температуры продуктов сгорания по длине печи, руководствуясь рекомендациями, изложенными в разд. 1.6.

Затем по формулам (1.12) или (1.13) определяют садку печи и, задаваясь производительностью, по формуле (1.11) рассчитывают продолжительность нагрева.

Далее производят расчет нагрева металла и определяют, можно ли за такое время получить металл с заданными температурными характеристиками. Если нет, то задаются новой производительностью, а тем самым и новой продолжительностью нагрева до тех пор, пока определится производительность, при которой будет обеспечено заданное качество нагрева.

Продолжение табл. II.1

Топливо*	$Q_р^н$ МДж/м³		$q_г$, кг/м³		$q_д$, кг/м³ при $\alpha=1,0$	Состав топлива, % (объеми.)												Рисунок
	влажного	сухого	влажного	сухого		CO	H_2	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12}	C_mH_n	CO_2	O_2	N_2	H_2O	
ПД	7,55	7,70	1,23	1,24	1,33	23,3	2,1	11,8	—	—	—	—	0,2	10,5	—	50,0	2,1	II.22
	12,5	12,8	1,15	1,15	1,28	9,1	1,7	26,4	0,2	0,1	0,1	0,1	—	8,6	—	41,9	1,8	II.23
	14,6	15,0	1,11	1,12	1,27	17,3	1,5	32,5	0,2	0,2	0,2	0,1	—	7,8	—	38,5	1,7	II.24
	16,7	17,0	1,07	1,08	1,27	15,5	1,4	38,8	0,3	0,2	0,2	0,1	—	7,0	—	35,0	1,5	II.25
	18,8	19,2	1,06	1,06	1,26	13,3	1,2	12,2	1,8	0,5	0,2	0,1	—	6,0	—	33,1	1,6	II.26
	21,0	21,3	1,00	1,01	1,25	11,9	1,1	51,2	0,4	0,3	0,3	0,1	—	5,3	—	28,1	1,3	II.27
	25,1	25,2	0,93	0,94	1,24	8,3	0,8	63,5	0,5	0,3	0,3	0,1	—	3,8	—	21,3	1,1	II.28
	29,3	29,5	0,86	0,85	1,24	4,7	0,4	76,0	0,6	0,4	0,4	0,2	—	2,1	—	14,4	0,8	II.29
ПК	26,8	27,2	0,50	0,60	1,23	3,70	30,9	56,00	1,55	0,45	0,35	—	—	1,55	0,45	1,70	1,5	II.30**
	30,2	30,3	0,68	0,68	1,23	1,90	13,6	78,3	—	—	—	—	0,5	0,70	0,50	4,00	0,5	II.31
ПКД	—	11,8	—	1,0	1,28	21,9	22,7	14,0	0,8	1,0	0,1	—	—	10,9	0,10	28,5	—	II.32
	13,5	13,8	0,98	0,98	1,27	19,7	21,5	18,5	1,3	1,2	0,2	—	—	10,0	0,10	25,4	2,0	II.33
Н	—	42,5	—	0,94	1,24	—	—	79,5	6,2	5,4	3,7	0,5	—	0,40	—	4,3	—	II.34
	—	46,7	—	1,02	1,25	—	—	72,3	10,0	8,0	4,0	1,6	—	0,05	—	4,0	—	II.35
	51,1	51,5	1,11	1,12	1,25	—	—	66,8	11,3	9,4	4,1	4,5	—	0,10	—	3,0	0,8	II.36
	—	63,8	—	1,49	1,26	—	—	34,3	19,0	21,0	9,7	6,0	—	1,0	—	9,0	—	II.37
Г	5,8	6,07	1,10	1,12	1,33	28,3	12,9	1,9	—	—	—	—	0,2	4,3	0,2	47,9	4,2	II.39
	6,1	6,32	1,08	1,10	1,32	23,1	16,8	2,9	—	—	—	—	0,4	8,6	0,2	43,8	4,2	II.40

Примечание. 1. Для смеси пропан-бутан (рис. II.38) теплота сгорания C_3H_8 — 91,28 МДж/м³ и C_4H_{10} — 118,67 МДж/м³.

2. Распыленный воздухом мазут марки 100 (рис. II.41) состава, % (по массе): 85,6 C; 10,5 H_2; 0,5 N_2; 0,5 O_2; 0,7 S; 2,0 *W*; 0,2 *A*, имеет теплоту сгорания $Q_р^н = 39{,}65$ МДж/кг и плотность продуктов сгорания (при $\alpha=1{,}0$) $q_д = 1{,}31$ кг/м³.

3. Для смесей природного, коксового и доменного газов см. рис. II.42.

* Д — доменный газ; К — коксовый газ; П — природный газ; ДК — смесь доменного и коксового газов; ПД — смесь природного и доменного газов; ПК — смесь природного и коксового газов; ПКД — смесь природного, коксового и доменного газов; Н — попутный нефтяной газ; Г — генераторный газ.

** Помимо указанного состава, топливо П и ПК содержит соответственно 3,57 и 1,85 % (по массе) C_2H_4.

Глава 2

НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ТОЛКАТЕЛЬНЫЕ ПЕЧИ

2.1. Характеристика толкательных печей

Толкательные печи установлены перед большинством мелкосортных, проволочных, сортовых и листовых станов на отечественных металлургических заводах. Эти печи характеризуются противоточным движением нагреваемого металла и продуктов сгорания, а также наличием в начале печи (со стороны посада металла) развитой неотапливаемой методической зоны, вследствие чего их часто называют методическими печами. В современных нагревательных толкательных печах не всегда эти принципы строго соблюдают. Например, создают прямоточные и смешанные прямо-противотодные зоны отопления, устанавливают горелки в методической зоне. Однако в целом отличительные черты этих печей сохраняются и основные принципы расчета остаются прежними.

2.2. Классификация печей и условия нагрева металла

Нагревательные толкательные печи классифицируют по наличию нижнего обогрева и по теплотехническому режиму нагрева металла (двухзонный и трехзонный режимы). Кроме того, печи разделяют по способу отопления (торцевое, сводовое и боковое), а при торцевом отоплении, когда зоны отопления четко выражены конструктивно, печи классифицируют также по числу зон отопления (двух, трех и т. д.). На рис. 2.1 приведены профили основных типов нагревательных толкательных печей.

Наличие нижнего подогрева определяет характер граничных условий для нагреваемого металла. Металл толщиной до 100 мм нагревают с одной стороны в печах без нижнего подогрева, а толщиной >100 мм — с двух сторон в печах с нижним подогревом.

При этом для организации нижнего подогрева металл проталкивают над нижними зонами по водоохлаждаемым подовым трубам. В результате охлаждающего и экранирующего действия подовых труб на металле образуются относительно холодные участки — «темные пятна». Для их ликвидации и повышения равномерности нагрева в конце печи (по ходу металла) создают участок одностороннего нагрева на монолитном поду, где в отсутствие подовых труб происходит выравнивание температур в металле. Таким образом, неравномерность температур, создаваемая подовыми трубами, существенно влияет на распределение температур в металле и тем самым на продолжительность нагрева. Поэтому влияние подовых труб на температурное поле в металле необходимо учитывать при расчете.

Характеристика теплотехнических режимов нагрева металла (двухзонного и трехзонного) была дана в разд. 1.4.

Способ отопления и количество зон отопления определяют распределение температуры продуктов сгорания по длине печи.

2.3. Расчетная схема нагрева металла

Для составления расчетной схемы нагрева металла в соответствии с условиями, для которых получены аналитические решения (см. разд. 5. Введения), принимают следующие допущения.

Поскольку заготовки в толкательной печи образуют сплошной плот, а толщина заготовок значительно меньше, чем длина и ширина плота, то металл в печи рассматривают как неограниченную пластину.

Распределение температур над и под металлом на участке двустороннего обогрева считают одинаковым.

Учитывая условия и теплотехнический режим нагрева в нагревательной толкательной печи, расчетную схему нагрева металла в теплотехнических зонах принимают в соответствии с табл. 2.1.

ТАБЛИЦА 2.1. РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ НАГРЕВА МЕТАЛЛА (ПЛАСТИНЫ) В ТОЛКАТЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ

Печь	Нагрев	Зона		
		методическая	сварочная	томильная
Без нижнего обогрева	Двухзонный	Односторонний нагрев в среде с линейно возрастающей температурой при ее равномерном (холодный посад) или параболическом (горячий посад) начальном распределении	Односторонний нагрев в среде с постоянной температурой при ее параболическом начальном распределении	—
	Трехзонный			Односторонний нагрев в среде с постоянной температурой при ее параболическом начальном распределении
С нижним обогревом	Двухзонный	Двусторонний нагрев в среде с линейно возрастающей температурой при ее равномерном (холодный посад) или параболическом (горячий посад) начальном распределении	Двусторонний нагрев в среде с постоянной температурой при ее параболическом начальном распределении	—
	Трехзонный			Односторонний нагрев в среде с постоянной температурой при ее параболическом начальном распределении

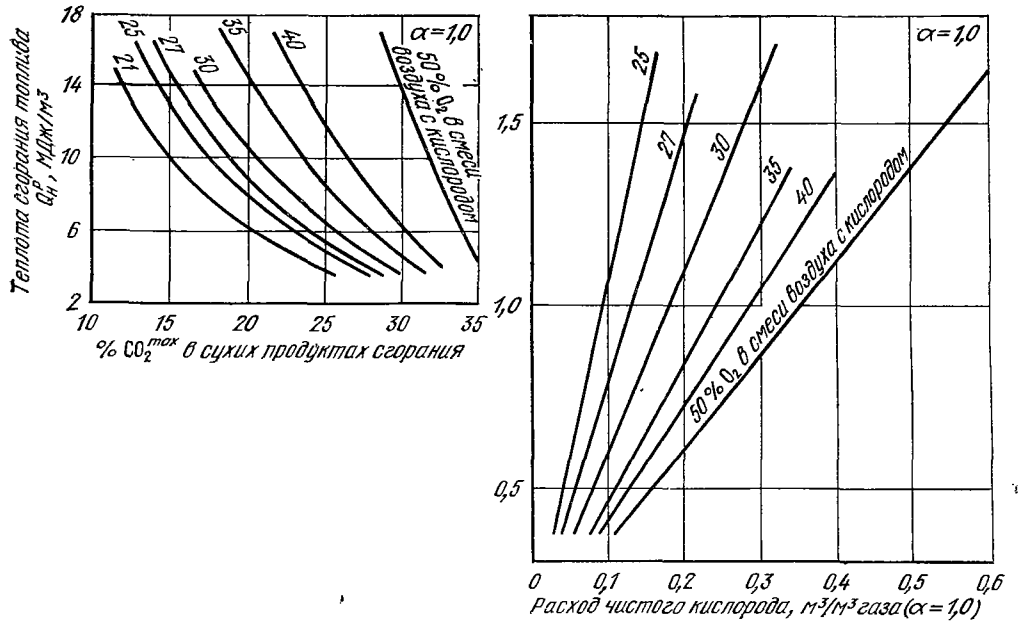


Рис. II.43. Расчет сгорания смеси доменного и коксового газов в обогащенном кислородом воздухе. Расход чистого кислорода для обогащения воздуха и % CO_2^{max} в сухих продуктах сгорания

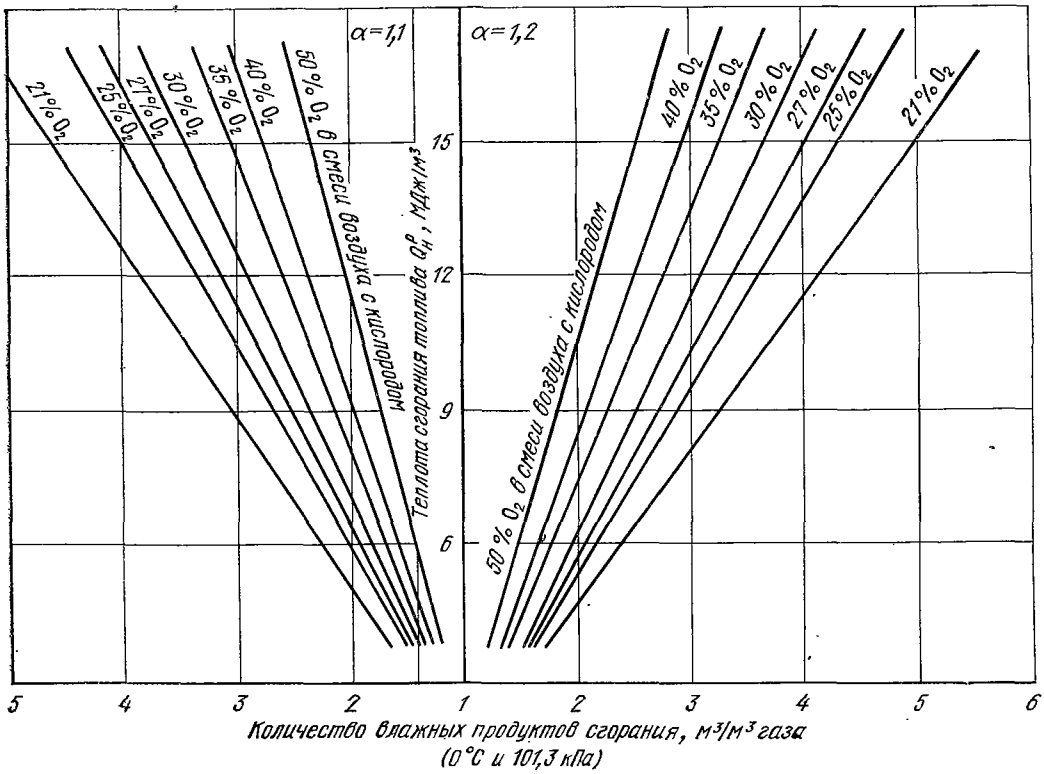


Рис. II.45. Расчет сгорания смеси доменного и коксового газов в обогащенном кислородом воздухе. Количество продуктов сгорания при коэффициентах избытка кислорода α=1,1 и 1,2

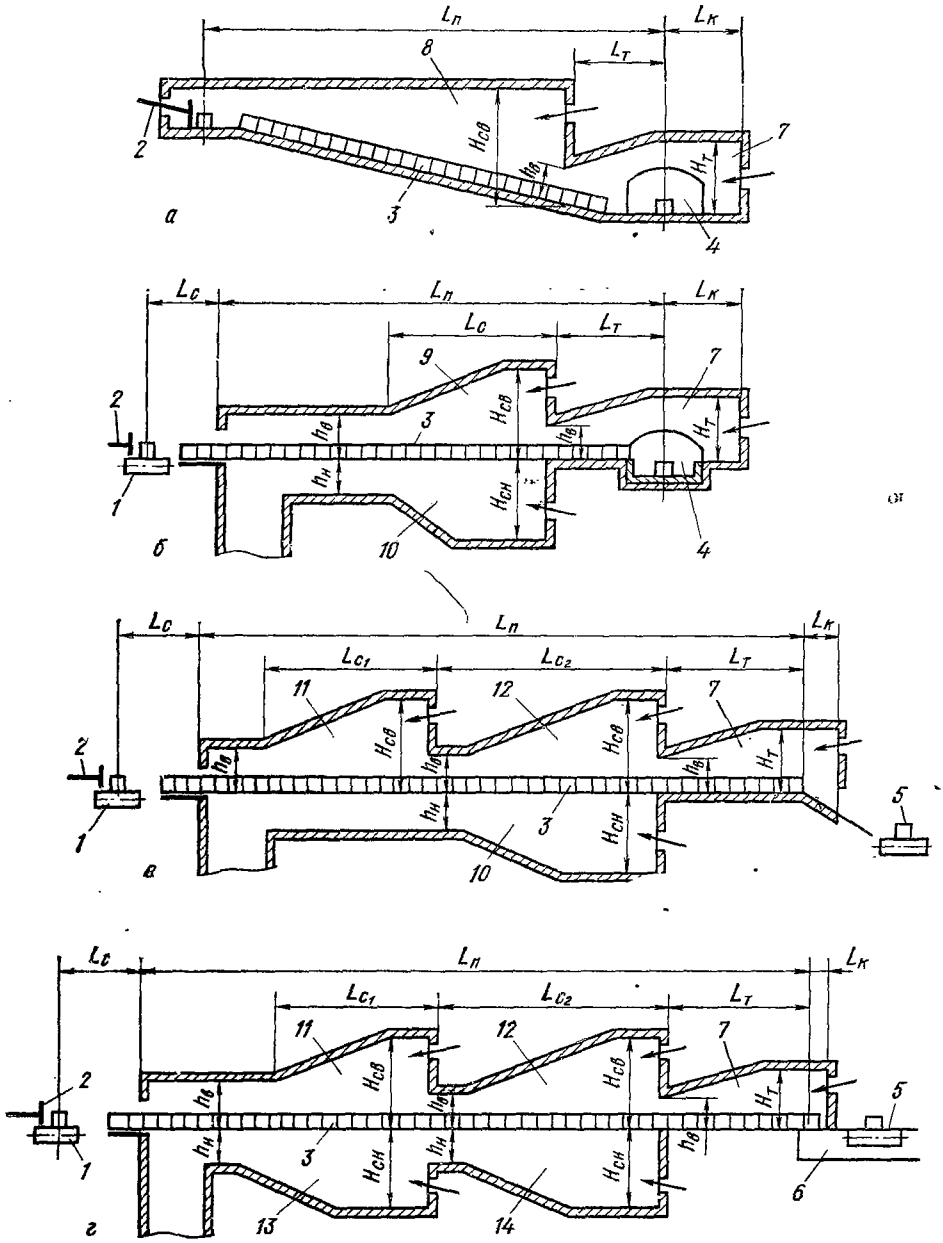


Рис. 2.1. Профили основных типов нагревательных толкательных печей (значения размеров в табл. 2.2):

а — двухзонная печь без нижнего обогрева, с наклонным подом, с боковой загрузкой и выдачей; *б* — трехзонная печь с нижним обогревом, с торцовой загрузкой и боковой выдачей; *в* — четырехзонная печь с нижним обогревом, с торцовой посадкой и выдачей; *г* — пятизонная печь с нижним обогревом, с торцовой посадкой и торцовой выдачей при помощи машины выдачи; *1* — рольганг загрузки; *2* — толкатель; *3* — нагреваемый металл; *4* — окно выдачи; *5* — рольганг выдачи; *6* — штанги машины выдачи; *7* — томильная зона; *8* — сварочная зона; *9* — верхняя сварочная зона; *10* — нижняя сварочная зона; *11* — 1-я верхняя сварочная зона; *12* — 2-я верхняя сварочная зона; *13* — 1-я нижняя сварочная зона; *14* — 2-я нижняя сварочная зона

2.4. Последовательность расчета нагрева металла

При расчете нагрева металла во вновь проектируемой печи обычно известны размеры, физические и теплофизические свойства нагреваемого металла, а также его начальное и конечное температурные состояния (холодный или горячий посад, конечная температура поверхности, допустимый конечный перепад температур по сечению). Кроме того, должны быть известны технологические ограничения, накладываемые на процесс нагрева.

Для расчета необходимо прежде всего задаться распределением температуры продуктов сгорания по длине печи. С этой целью следует выбрать режим нагрева металла (двухзонный или трехзонный) согласно рекомендациям (см.

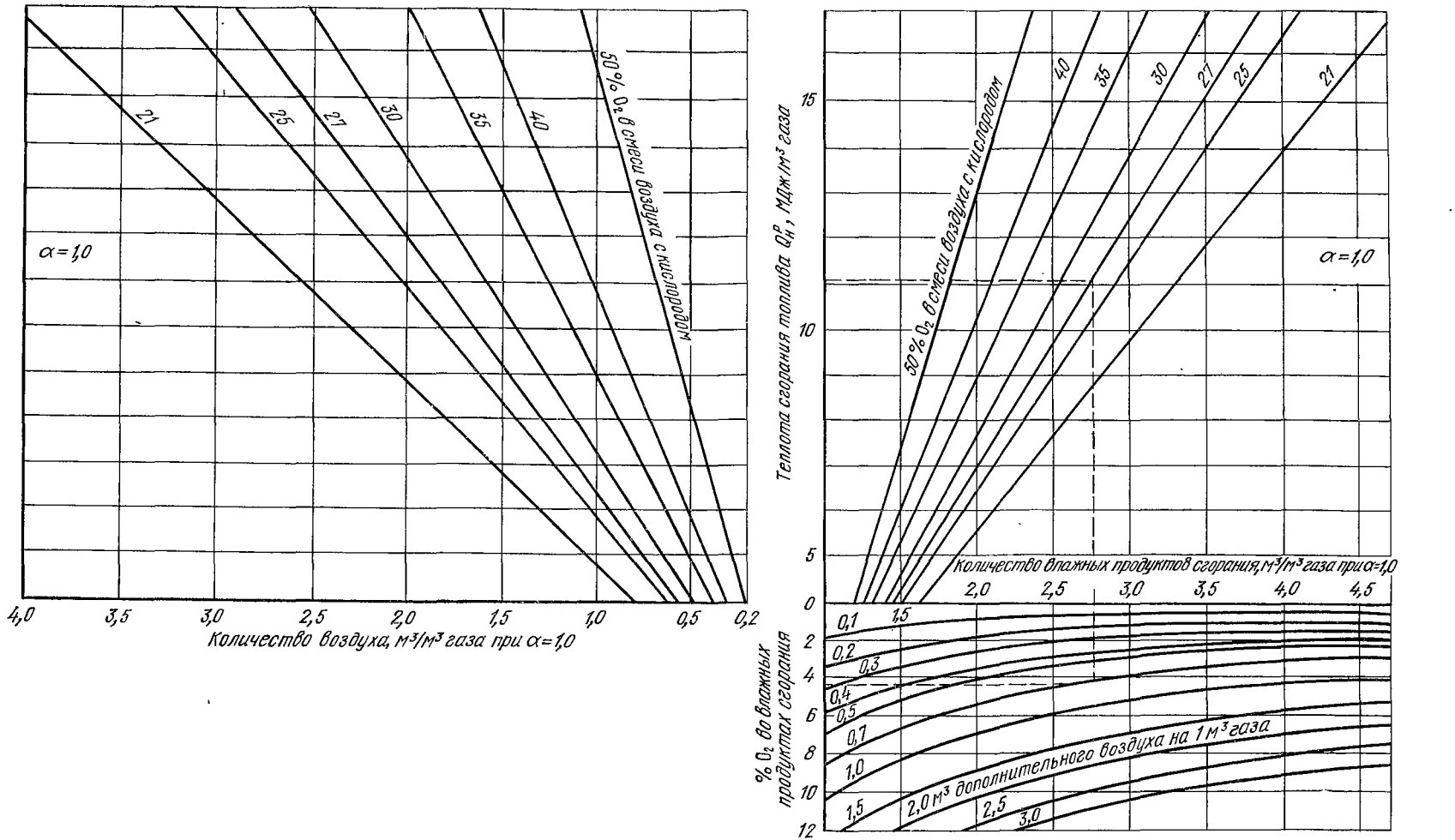


Рис. II.44. Расчет сгорания смеси доменного и коксового газов в обогащенном кислородом воздухе. Количество необходимого для сгорания воздуха, продуктов сгорания на 1 м³ газа и % O_2 во влажных продуктах сгорания

ТАБЛИЦА 2.2. ОСНОВНЫЕ РАЗМЕРЫ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ТОЛКАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

Рисунок	Отношение, %			Размер, м					
	$L_{с1}/L_п$	$L_{с2}/L_п$	$L_т/L_п$	$H_{св}$	$H_{си}$	$H_т$	$h_в$	$h_н$	$L_к$
2.1,*а*	—	—	28—37	2,6—3,0	—	1,6—1,85	0,55—0,85	—	1,0—1,3
2,1,*б*	—	27—37	24—30	2,6—3,0	2,2—2,6	1,5—1,7	0,7—0,8	1,0—1,2	1,2—1,7
2,1,*в*	22—28	27—32	24—26	2,6—3,0	2,2—2,6	1,5—1,7	0,7—0,8	1,0—1,2	1,2—1,7
2.1,*г*	22—28	27—32	24—26	2,6—3,0	2,2—2,6	1,5—1,7	0,7—0,8	1,0—1,2	1,0—1,4

разд. 1.4) и принять значения температуры продуктов сгорания в зонах (см. разд. 1.6). Затем полученный график распределения температуры продуктов сгорания делят на расчетные участки (см. разд. 1.5). На каждом участке принимают расчетную схему нагрева по табл. 2.1.

Далее предварительно определяют общую продолжительность нагрева металла в печи по формуле (1.1) и продолжительность нагрева металла на расчетных участках в соответствии с их разбивкой. Так как расчетные участки целесообразно совмещать с зонами отопления, то при определении продолжительности нагрева на расчетных участках можно пользоваться практическими данными об относительной длине зон отопления нагревательных толкательных печей, приведенными в табл. 2.2.

Расчет нагрева металла в печи ведут по расчетным участкам, начиная с первого по ходу металла. Сначала на этом участке производят расчет теплообмена излучением в рабочем пространстве, согласно методике, изложенной в разд. 13.1.4, в результате чего находят приведенный коэффициент излучения. Необходимые для этого расчета размеры рабочего пространства (ширину и высоту) определяют по методике, описанной в разд. 1.8.

Затем для первого по ходу металла расчетного участка задаются конечной температурой поверхности металла. Эта температура необходима для того, чтобы определить усредненные на расчетном участке теплофизические свойства металла и коэффициенты теплоотдачи. Усредненные теплофизические свойства металла определяют по табл. V.46—V.51 при средней на расчетном участке температуре поверхности металла.

Коэффициенты теплоотдачи определяют по методике, изложенной в разд. 13.3.4. При этом теплоотдачу конвекцией не учитывают ($\alpha_{конв}=0$), а принимают ее в запас расчета. Коэффициент теплоотдачи излучением, определяемый по формуле (13.48), находят для начала и конца расчетного участка. Усредненный коэффициент теплоотдачи на расчетном участке находят путем арифметического усреднения коэффициентов теплоотдачи излучением в начале и в конце участка.

Затем определяют массивность нагреваемого тела по методике, изложенной в разд. 13.3.3. Входящая в числа Био и Старка величина расчетной толщины металла равна полной толщине металла при одностороннем нагреве и половине толщины при двустороннем нагреве. Расчет нагрева тонкого металла ведут по закону излучения (см. разд. 13.3.5).

При расчете нагрева массивного металла по усредненным значениям теплофизических свойств металла (коэффициенты теплопроводности и температуропроводности) и коэффициента теплоотдачи излучением определяют значения чисел Био и Фурье по формулам (13.44) и (13.66). Затем согласно принятой для расчетного участка схеме нагрева по табл. 13.5 подбирают подходящее решение уравнения теплопроводности в критериальной форме.

По графикам рис. I.16—I.54 исходя из известных значений чисел Био и Фурье находят значения функций, входящих в решение. В результате получают температуры поверхности и центра металла, а также среднюю по сечению температуру, которая необходима в дальнейшем для составления теплового баланса зон печи.

Полученную расчетом конечную температуру поверхности металла сравнивают с предварительно заданной, и если они сильно различаются, то задаются новой конечной температурой поверхности металла, более близкой к полученной, а расчет повторяют заново. Практически совпадение заданной и полученной расчетом температур должно быть в пределах 15—20 °С. Если такое совпадение получено, переходят к расчету нагрева металла на следующем по ходу металла расчетном участке.

2.5. Порядок учета влияния подовых труб

Учет влияния подовых труб производят по методике, изложенной в разд. 13.3.10. Расчет ведут на изолированные и неизолированные трубы. При определении температурного фактора стока температуру поверхности неизолированных труб принимают равной 300 °С. Температуру поверхности изоляции для изолированных подовых труб необходимо рассчитывать. Для сварочной зоны с температурой продуктов сгорания 1300—1350 °С температуру поверхности изоляции подовых труб принимают равной 1150—1200 °С.

О степени неравномерности нагрева металла на подовых трубах судят по величине неравномерности средних по толщине металла температур над подовой трубой и посередине между подовыми трубами, т. е. в сечениях, где влияние подовых труб соответственно наибольшее и наименьшее. Неравномерность нагрева по длине определяют только в конце нагрева. Обычно эта величина не должна превышать заданной конечной неравномерности по сечению металла. Неравномерность нагрева по длине в основном определяется относительной продолжительностью нагрева металла на монолитной подине.

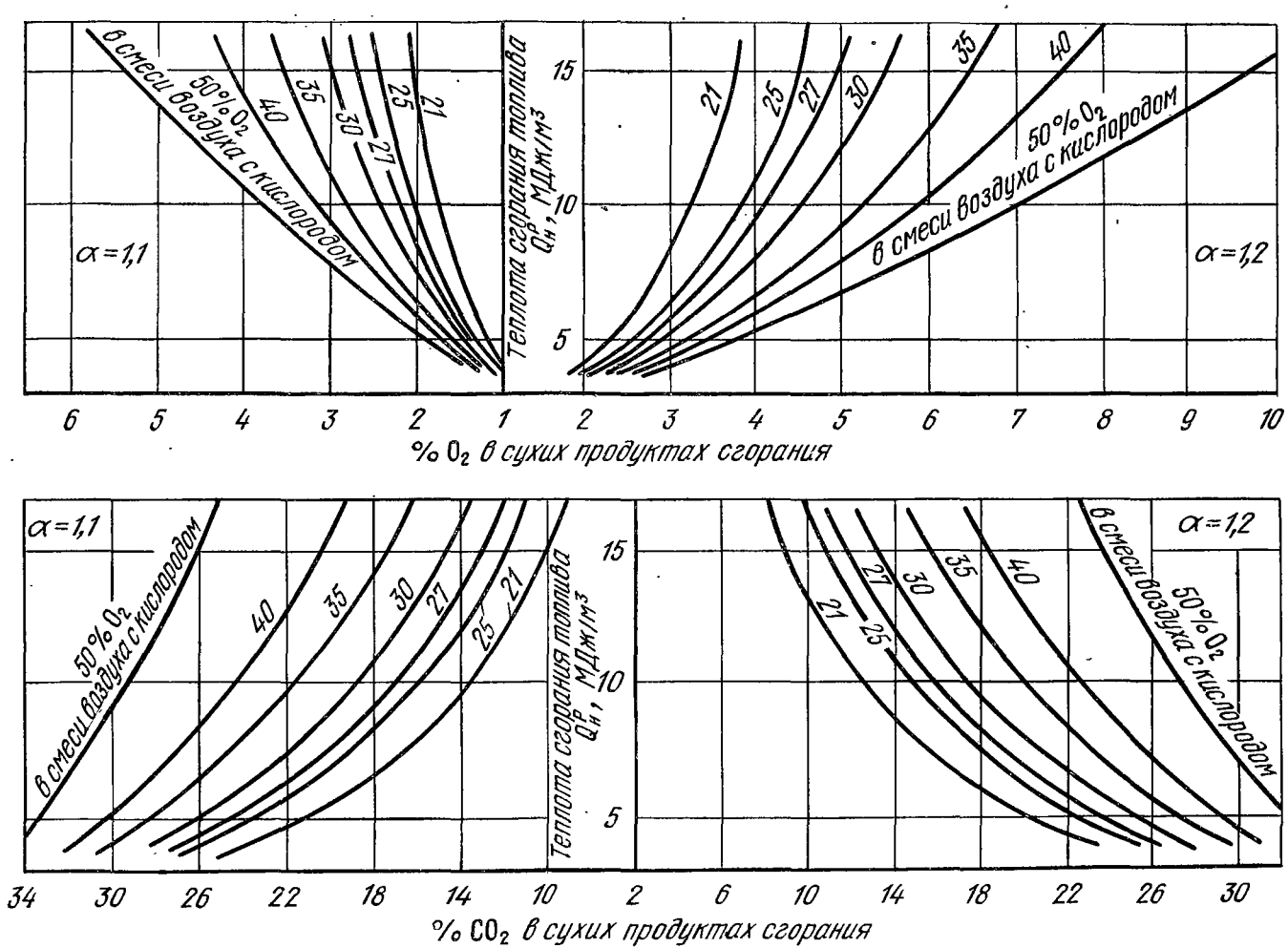


Рис. II.46. Расчет сгорания смеси доменного и коксового газов в обогащенном кислородом воздухе, % O_2 и % CO_2 в сухих продуктах сгорания при коэффициентах избытка кислорода α=1,1 и 1,2

2.6. Последовательность уточнения результатов и алгоритм расчета нагрева металла

Когда закончен расчет нагрева металла на всех участках, сравнивают конечное температурное состояние металла на последнем участке с заданным по технологии нагрева. Если полученная расчетом конечная температура поверхности металла окажется ниже заданной, то необходимо увеличить относительную продолжительность нагрева в сварочной зоне за счет методической (температура поверхности металла в томильной зоне мало меняется) или поднять температуру продуктов сгорания в сварочной зоне, и наоборот.

Когда рассчитанный перепад температур по толщине металла окажется больше допустимого, необходимо увеличить общую продолжительность нагрева металла.

Если полученная расчетом неравномерность нагрева по длине окажется выше допустимой, необходимо увеличить относительную продолжительность нагрева в томильной зоне (на монолитной подине).

Когда окажутся невыполненными технологические ограничения, накладываемые на процесс нагрева, необходимо выполнить повторный расчет при измененных температуре продуктов сгорания и (или) соотношении зон. Например, если скорость нагрева или перепад температур по сечению металла в процессе нагрева окажутся выше допустимых, необходимо снизить температуру сварочной зоны или увеличить продолжительность нагрева в методической зоне за счет сварочной. При этом может потребоваться увеличение общей продолжительности нагрева.

Таким образом, варьируя температурой продуктов сгорания, общей продолжительностью нагрева и относительной продолжительностью нагрева в различных зонах, можно получить необходимое конечное температурное состояние металла и соблюсти технологию нагрева.

Алгоритм расчета нагрева металла в нагревательной толкательной печи приведен на рис. 2.2.

2.7. Основные размеры рабочего пространства печи

Садку печи или группы печей определяют по методике, изложенной в разд. 1.7.

Длину полезного пода для толкательных печей определяют (см. рис. 2.1): при боковой загрузке — от оси окна загрузки; при торцевой загрузке — от наружного края окна загрузки; при боковой выдаче — до оси окна выдачи; при торцевой выдаче — до изгиба пода при выдаче на склиз или до крайнего положения в печи штанг машины безударной выдачи.

Длину полезного пода печи или группы печей подсчитывают по формулам (1.3) или (1.4).

Коэффициент заполнения полезной длины k_3 в толкательной печи учитывает неплотную укладку заготовок, вызванную их кривизной, и принимается в пределах 0,98—1.

Длину полезного пода одной печи ограничивают по условиям проталкивания. Максимальная длина проталкивания $L_т$ по отношению к толщине заготовок S должна быть в следующих пределах: при толкании заготовок квадратного или близкого к квадратному сечения по горизонтальному поду $L_т \leqslant 220S$; при толкании слябов по горизонтальному поду $L_т \leqslant 250S$; при толкании заготовок квадратного или близкого к квадратному сечения по наклонному поду с углом наклона 6° в печах с нижним обогревом или 7—8° в печах без нижнего обогрева $L_т \leqslant 250S$; при толкании тех же заготовок по лекальному поду с максимальным углом наклона в стороне загрузки 10° $L_т \leqslant 300S$.

Максимальная длина полезного пода одной печи $L_{пл}^{max} = L_т$ при боковой загрузке и $L_{пл}^{max} = L_т - L_с$ при торцевой загрузке, где $L_с$ расстояние от оси загрузочного рольганга до наружного края окна загрузки, м (см. рис. 2.1).

Если полученная расчетом по формулам (1.2) или (1.3) необходимая длина полезного пода больше, чем максимальная длина полезного пода одной печи ($L_п > L_{пл}^{max}$), то следует устанавливать две или более печей.

Длину габаритного пода $L_г$ определяют по длине полезного пода в соответствии с рекомендациями, приведенными в табл. 2.2. В этой таблице приведены практические данные о высоте рабочего пространства для различных типов печей. При сводовом отоплении высоту рабочего пространства принимают равной 1,25—1,75 м.

Ширину рабочего пространства, площади и напряжения активного и габаритного пода определяют по методике и формулам, приведенным в разд. 1.8.

2.8. Тепловой баланс

Тепловой баланс толкательной печи рассчитывают по методике, приведенной в гл. 15.

Угар металла в толкательных печах принимают равным 1 %.

Для определения расхода тепла на нагрев металла подсчитывают изменение теплосодержания по изменению средней по сечению температуры металла с учетом влияния охлаждаемых подовых труб. Тепловые балансы составляют для неизолированных подовых труб с тем, чтобы максимальная производительность печи была обеспечена при любых условиях.

При определении потребления тепла печью тепловой баланс составляют для изолированных подовых труб. Подсчитанные при этих условиях потребление и удельный расход тепла будут минимальными. В случае, если разрушившаяся изоляция подовых труб не будет своевременно восстановлена, потребление и удельный расход тепла соответственно возрастут.

При расчете тепловой мощности печи и зон отопления руководствуются рекомендациями, приведенными в разд. 1.9.

Для печей с нижним обогревом отдельно рассчитывают тепловые балансы верхних и нижних половин расчетных участков (верхних и нижних зон отопления), так как в нижних зонах отопления в расходную часть теплового баланса добавляются потери тепла через охлаждаемые подовые трубы, поэтому тепловые мощности верхних и нижних зон отопления могут существенно отличаться.

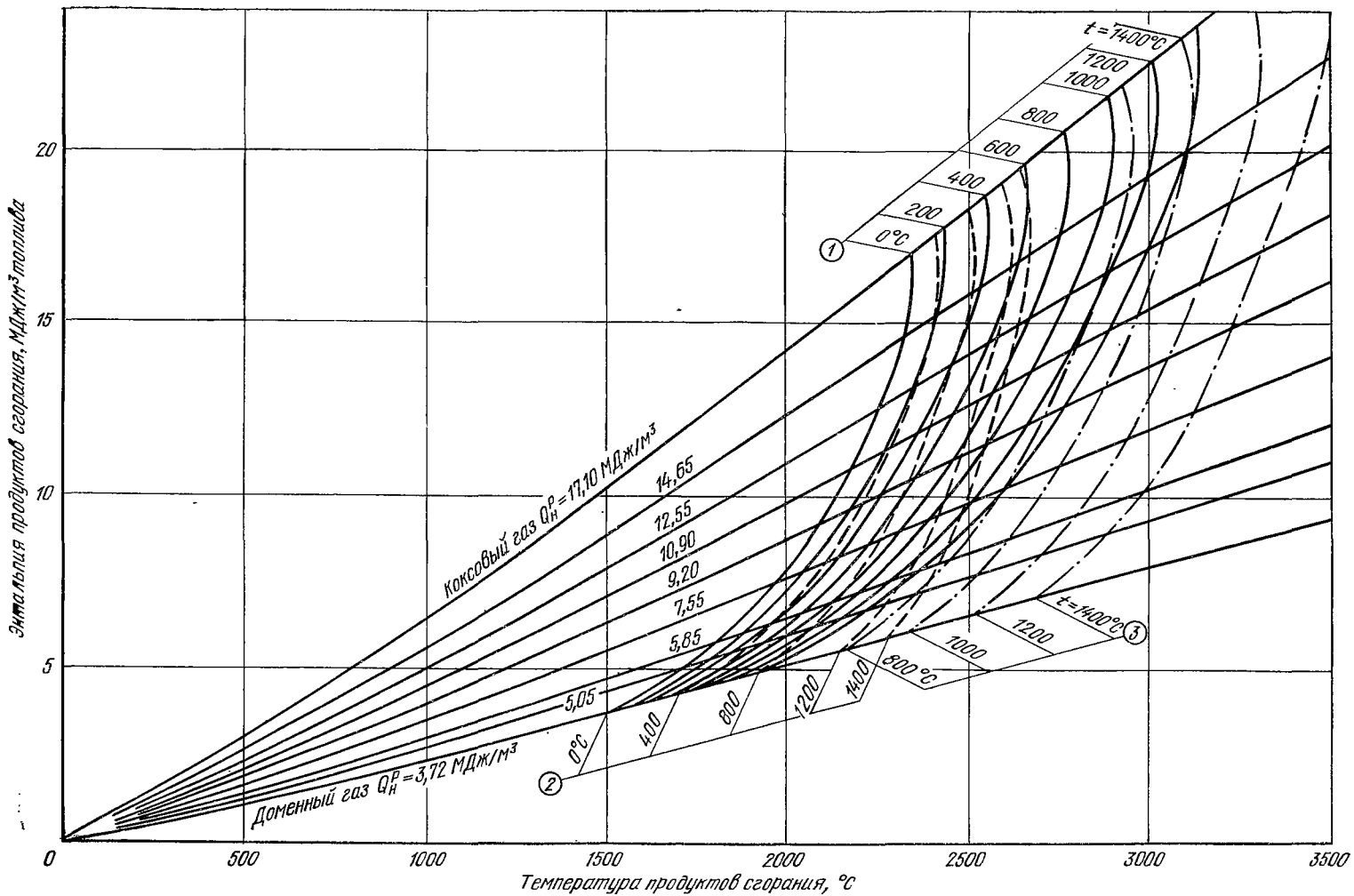


Рис. II.47. Расчет сгорания смеси доменного и коксового газов в обогащенном кислородом воздухе при 25 % O_2 и коэффициенте избытка кислорода α=1,0. Калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха (сплошные линии), газа (штриховые) и подогрева газа и воздуха до одинаковой температуры (штрих-пунктирные)

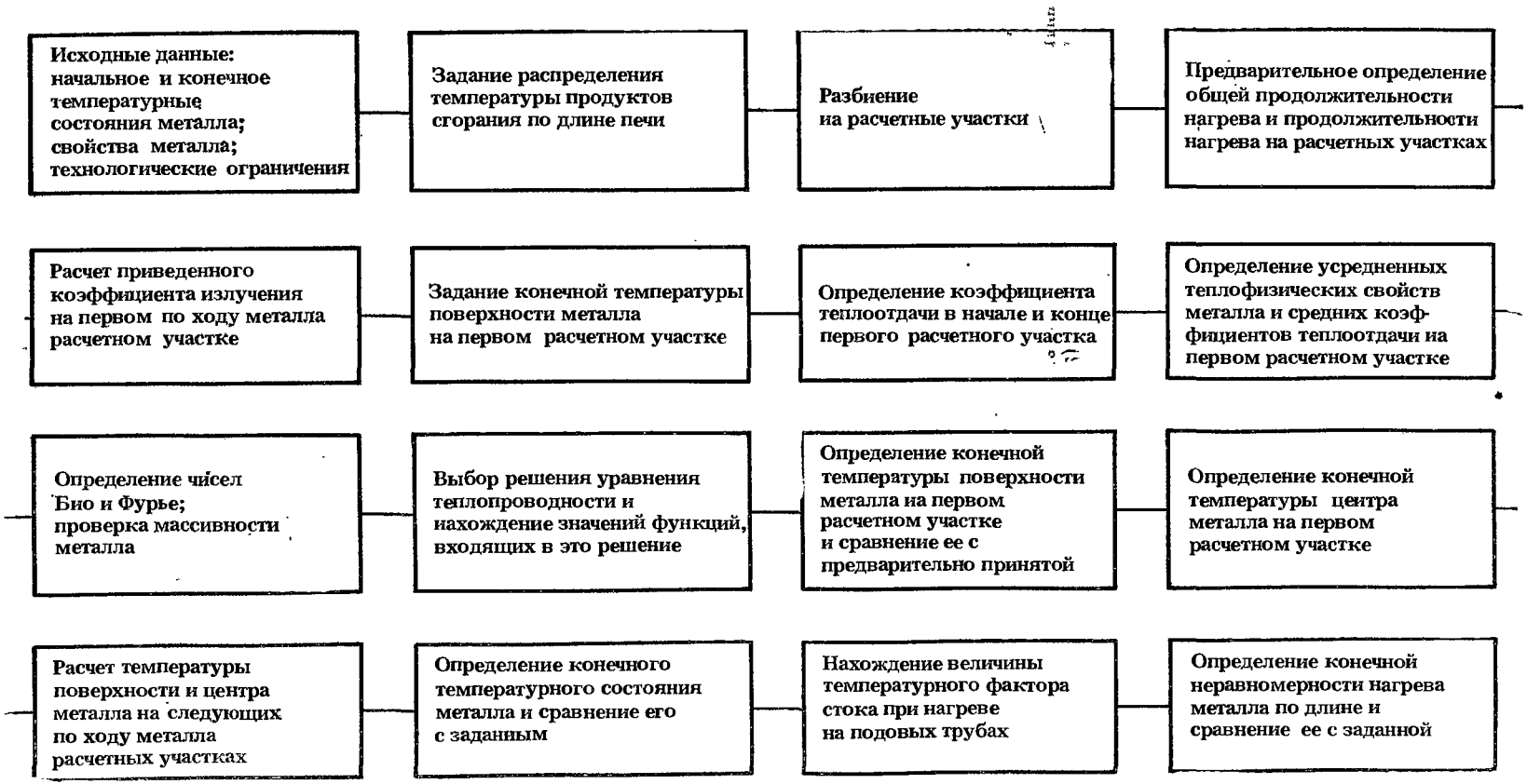


Рис. 2.2. Алгоритм расчета нагрева металла в нагревательной толкательной печи

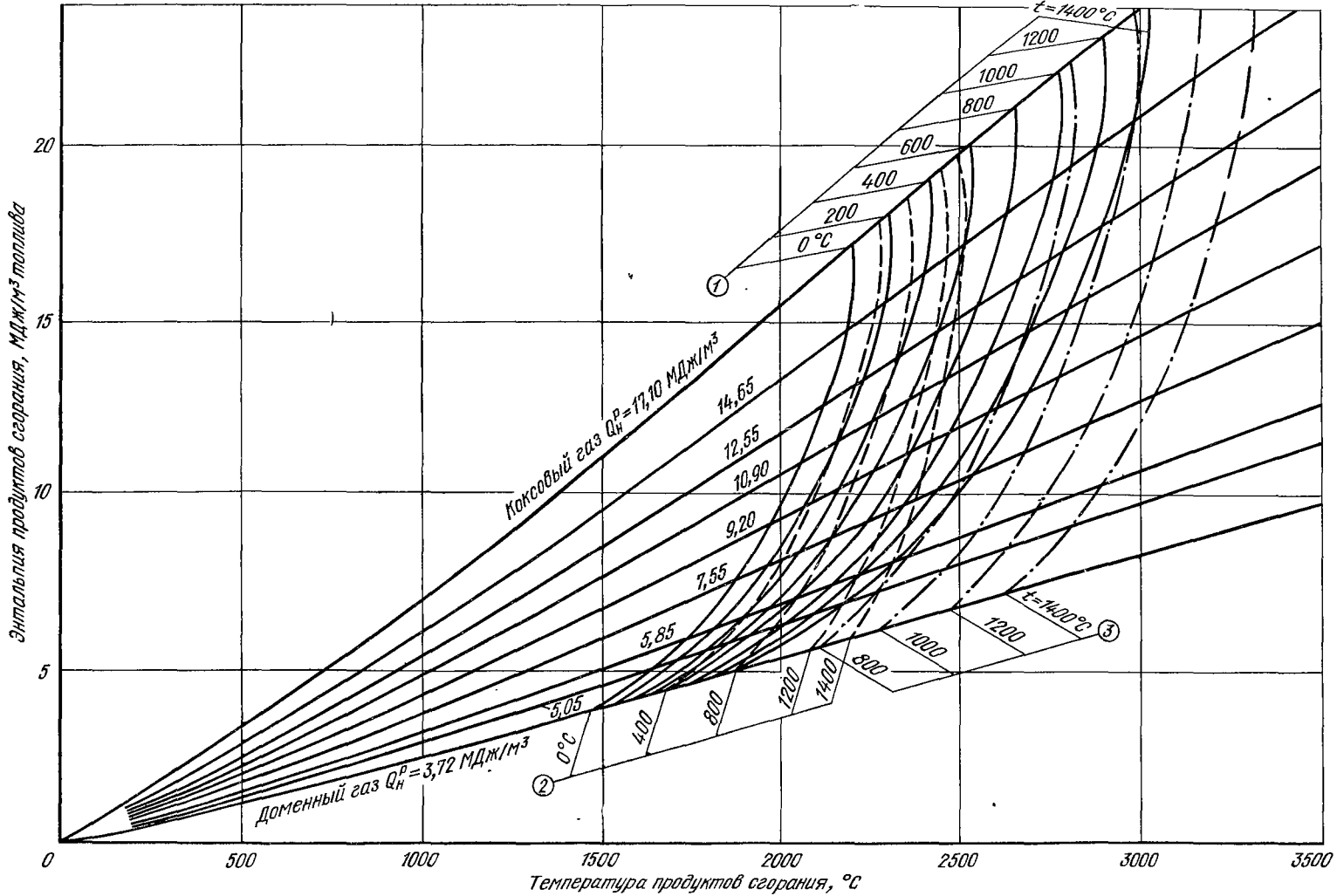


Рис. II.48. Расчет сгорания смеси доменного и коксового газов в обогащенном кислородом воздухе при 25 % O_2 и коэффициенте избытка кислорода α=1,1 (усл. обознач. см. рис. II.47)

2.9. Пример расчета нагревательной толкательной печи

Исходные данные:

назначение печи — нагрев слябов перед прокаткой на широкополосном стане;

размеры нагреваемых слябов, м: толщина $S=0{,}25$, ширина $b=1{,}85$, длина $l=10{,}5$;

качество металла — низкоуглеродистая сталь;

начальная температура металла 20 °С (холодный посад);

конечная температура поверхности металла 1220 °С;

допустимый конечный перепад температур по сечению металла 40 °С;

нагрев — без ограничений;

производительность стана при прокатке таких слябов (в пересчете на всад) $P_{ст}=1125$ т/ч;

топливо — природный газ с теплотой сгорания $Q^{р}_{н}=35$ МДж/м^3;

температура подогрева воздуха $t_в=400$ °С.

Принимаем для нагрева слябов однорядные толкательные печи с нижним обогревом, с торцевой посадкой и выдачей, с пятью зонами отопления (см. рис. 2.1, *г*).

Принимаем трехзонный режим нагрева с температурами продуктов сгорания (см. табл. 1.2): томильной зоны 1250 °С; сварочной зоны 1300 °С; методической зоны — повышение температуры с 1000 до 1300 °С.

Для расчета нагрева металла разбиваем график распределения температур на четыре расчетных участка (рис. 2.3).

Методическая зона:

участок I — неотапливаемая зона с повышением температуры продуктов сгорания от 1000 до 1100 °С;

участок II — 1-я зона отопления с повышением температуры продуктов сгорания от 1100 до 1300 °С.

Сварочная зона:

участок III — 2-я зона отопления с температурой продуктов сгорания 1300 °С.

Томильная зона:

участок IV — участок одностороннего нагрева на монолитном поду при температуре продуктов сгорания 1250 °С.

По табл. 1.4 для слябов низкоуглеродистой стали толщиной 0,25 м, нагреваемых в толкательной печи, удельное время нагрева принимаем $z=8{,}5$ мин/см. По формуле (1.1) общая продолжительность нагрева $\tau=8{,}5\times\times25=212{,}5$ мин $=3{,}55$ ч.

Относительные длины зон принимаем согласно табл. 2.2: неотапливаемая зона 14 %; 1-я зона отопления 32 %; 2-я зона отопления 32 %; томильная зона 22 %.

Исходя из принятых относительных размеров зон, продолжительность нагрева на расчетных участках составит:

участок I: $\tau_м=3{,}55\cdot14/100=0{,}5$ ч;

участки II и III: $\tau_с=3{,}55\cdot32/100=1{,}14$ ч;

участок IV: $\tau_т=3{,}55\cdot22/100=0{,}78$ ч.

Принимаем $\tau_м=0{,}5$ ч; $\tau_с=1{,}15$ и $1{,}1$ ч; $\tau_т=0{,}8$ ч. Тогда общая продолжительность нагрева $\tau=0{,}5+1{,}15+1{,}1+0{,}8=3{,}55$ ч.

Расчет теплообмена излучением в рабочем пространстве печи для каждого расчетного участка сведен в табл. 2.3.

Окончательный вариант расчета нагрева металла по участкам приведен в табл. 2.4.

Конечный перепад температур по толщине металла определяем как разность температур верхней и нижней поверхностей сляба, так как температура нижней ненагреваемой поверхности оказалась ниже, чем температура центра.

Расчет показывает, что принятое распределение температуры газов обеспечивает получение заданного конечного температурного состояния металла.

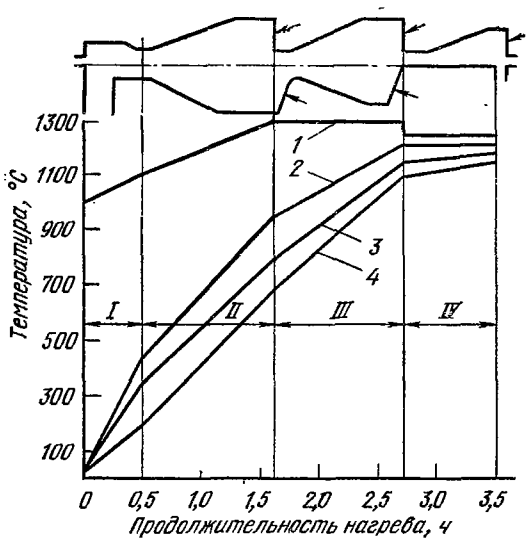


Рис. 2.3. Распределение температур в толкательной печи:

1 — температура продуктов сгорания; *2* и *3* — температуры поверхности и середины металла; *4* — средняя по сечению температура металла с учетом охлаждающего влияния подовых труб

Расчет конечного распределения температур в металле с учетом охлаждающего влияния подовых труб приведен в табл. 2.5.

Диаметр подовых труб $2R=0{,}146$ м и расстояние между ними $2L=1{,}1$ м определяют из их прочностного расчета.

Диаметр изолированной трубы $2R_1=2R+2\delta=0{,}146+2\cdot0{,}06=0{,}266$ м, где δ — толщина изоляции, м.

Температуру поверхности изолированной трубы $t_{оп}$ в конце сварочной зоны принимаем равной 1150 °С.

Расчет произведен для изолированных и неизолированных подовых труб. Результаты расчета показывают, что заданное качество нагрева — перепад температур по сечению сляба, не превышающий 40 °С, — обеспечивается только при полностью изолированных трубах.

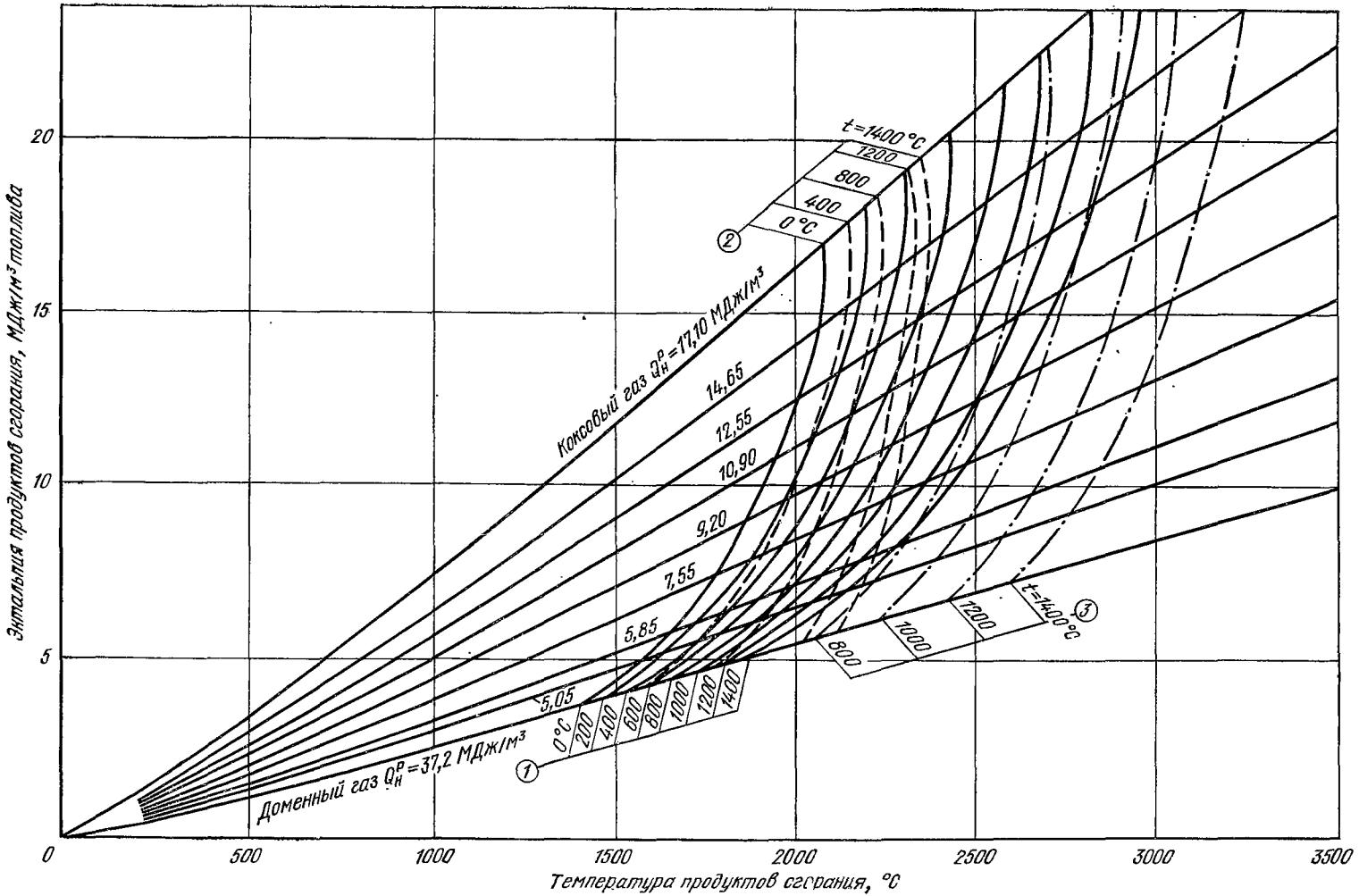
Расчет размеров печи сведен в табл. 2.6.

Расчет статей прихода тепла приведен в табл. 2.7; подогрев воздуха принимаем равным 400 °С.

Расчет расхода тепла на нагрев металла представлен в табл. 2.8.

Расчет потерь тепла через кладку приведен в табл. 2.9, а через монолитный под участка IV (томильной зоны) — на стр. 35.

Расчет потерь тепла на охлаждение неизолированных и изолированных подовых труб приведен в табл. 2.10, а на нагрев воды, охлаждающей различные элементы печи, — в табл. 2.11. При расчете принято, что вода в охлаждаемых элементах нагревается на 20 °С.


Энтальпия продуктов сгорания, МДж/м³ топлива
Температура продуктов сгорания, °С
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
3500
5
10
15
20
Коксовый газ $Q_н^р$ = 17,10 МДж/м³
14,65
12,55
10,90
9,20
7,55
5,85
5,05
Доменный газ $Q_н^р$ = 37,2 МДж/м³
t = 1400 °С
1200
800
400
0 °С
200
600
1000
1400
1
2
3