Библиотека СОК



А. А. ЩУКИН

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПЕЧИ И ГАЗОВОЕ ХОЗЯЙСТВО ЗАВОДОВ

ЭНЕРГИЯ

209782

А. А. ЩУКИН

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПЕЧИ И ГАЗОВОЕ ХОЗЯЙСТВО ЗАВОДОВ

(Газовое и печное хозяйство заводов)

Издание второе переработанное

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Промышленная теплоэнергетика».

«ЭНЕРГИЯ»
МОСКВА 1973

6П2.2
Щ 95
УДК 662.76.(075.8)

Щукин А. А.

Щ 95 Промышленные печи и газовое хозяйство заводов. Учебник для вузов. Изд. 2-е, перераб. М., «Энергия», 1973.

224 с. с ил.

Книга представляет собой общий курс газопечной теплотехники. В ней рассмотрены основы теории и устройства огнетехнических агрегатов (промышленных печей разного назначения), использования вторичных энергетических ресурсов, а также вопросы производства горючих газов и газоснабжения промышленных предприятий.

Книга предназначена в качестве учебника для студентов втузов, специализирующихся по промышленной теплоэнергетике, и может быть полезной для заводских теплоэнергетиков.

Щ $\frac{0332\text{-}101}{051(01)\text{-}73}$ 6-73

6П2.2

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3
Введение 4

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПЕЧИ

Глава первая. **Общие сведения о промышленных печах** 7
1-1. Назначение печей. Общая схема устройства печи. Классификация промышленных печей 7
1-2. Основные условия развития огнетехнического процесса в промышленных печах 11
1-3. Принципиальные схемы промышленных печей 13
Туннельные печи 14
Шахтные печи 15
Печи для обжига в кипящем слое 16
Вращающиеся печи 17
Печи для нагрева металла перед прокаткой и ковкой 18
Методические нагревательные печи 18
Камерные нагревательные и плавильные печи 19
Сталеплавильные мартеновские печи 19
Отражательные плавильные печи 21
Циклонные обжиговые и плавильные печи 22
Строительство печей 23
1-4. Энерготехнологическое комбинирование 25
1-5. Варианты использования топлива в промышленных печах 26
1-6. Роль электрического нагрева 29
Способы электрического нагрева. Техника достижения высоких температур в электротермических установках 30

Глава вторая. **Движение газов и материалов в печах** 35

2-1. Виды движения газов 35
2-2. Движение газов в слое зернистого и кускового материала или топлива 36
2-3. **Аэродинамика струй** 38
2-4. Геометрический напор газов 40
2-5. Движение газов в каналах 41
2-6. Расчет тяго-дутьевой установки 43
2-7. Особенности движения газов в печах 44
2-8. Струйные аппараты 44
2-9. Виды движения материалов 45

Глава третья. **Особенности сжигания топлива в промышленных печах** . 45

3-1. Общие сведения 45
3-2. Гомогенное горение 46
3-3. Ламинарное и турбулентное горение струй 48
3-4. Особенности сжигания газообразного топлива в печах. Классификация и устройство газовых горелок 50
3-5. Особенности сжигания мазута в печах 57
3-6. Особенности сжигания кускового твердого топлива в печах . . . 67
3-7. Особенности пылеугольного отопления печей 74

Глава четвертая. **Расчеты горения топлива** 77

4-1. Расчет полного горения топлива 77
4-2. Расчет неполного горения топлива 84
4-3. Расчет двухступенчатого горения топлива 92

Глава пятая. **Теплообмен в печах** 93

5-1. Организация теплопередачи в печах 93
5-2. Внешний и внутренний теплообмен 96
5-3. Теплопередача в печах с большим объемом свободного рабочего пространства 97
5-4. Режимы теплообмена в нагревательных и плавильных печах . . . 98
5-5. Равномерно распределенный внешний теплообмен в рабочем пространстве печи 99
5-6. Критериальный расчет внешнего теплообмена в рабочих камерах высокотемпературных печей 104
5-7. Направленный косвенный радиационный теплообмен 108
5-8. Внешний теплообмен в плотном (фильтрующем), падающем и кипящем слое материала 108

5-9. Внутренний теплообмен 111
5-10. Расчет нагрева изделий в печи с постоянной температурой (при $T_п$=const) 113
5-11. Расчет нагрева металла в печи с переменной температурой . . . 117
5-12. Рециркуляция газов как средство регулирования температуры и повышения тепловой эффективности печей 119

Глава шестая. **Тепловые и материальные балансы промышленных печей и расход топлива** 121

6-1 Типичные тепловые балансы печей 122
6-2 Коэффициенты полезного действия 127
6-3 Вычисление отдельных статей тепловых балансов печей 128
6-4 Удельные расходы топлива и способы их уменьшения 132
6-5 Материальные балансы печей 135

Глава седьмая. **Регенерация тепла газов, отходящих от печей. Автономный высокотемпературный нагрев воздуха** 136

7-1. Способы нагрева компонентов горения (воздуха и газообразного топлива) 136
7-2. Экономия топлива от применения горячего воздуха 138
7-3. Автономный высокотемпературный нагрев воздуха 140
7-4. Эффективность автономного нагрева воздуха 141
7-5. Регенераторы и рекуператоры для нагрева воздуха и газа 143
7-6. Расчет рекуператоров 148
7-7. Регенеративные воздухоподогреватели, предлагаемые для высокотемпературного нагрева воздуха 151
7-8. Расчет регенеративных воздухоподогревателей 155

Глава восьмая. **Использование вторичных энергетических ресурсов** . . 156
8-1. Общие сведения 156
8-2. Котлы-утилизаторы 156
8-3. Расчет котлов-утилизаторов 159
8-4. Испарительное охлаждение печей 161
8-5. Эксергетические балансы 162

РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

ГАЗОСНАБЖЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И ГАЗОВОЕ ХОЗЯЙСТВО ЗАВОДОВ

Глава девятая. **Горючие газы** 165

9-1. Общие сведения и классификация горючих газов 165
9-2. Добыча природного газа и дальнее газоснабжение 170
9-3. Физико-химическая характеристика природного газа 172
9-4. Сжиженный газ 173
9-5. Подземное хранение газа 174
9-6. Природный газ как химическое сырье 175

Глава десятая. **Снабжение природным газом промышленных предпрнятий**

10-1. Схемы газоснабжения 175
10-2. Значение охраны труда 180
10-3. Расчет газопроводов 180

Глава одиннадцатая. **Производство искусственных газов и их использование** 183

11-1. Сущность сухой перегонки топлива 183
11-2. Полукоксование твердого топлива и полукоксовый газ 186
11-3. Коксование твердого топлива и коксовый газ 189
11-4. Доменный процесс и получение доменного газа 194
11-5. Схемы газового хозяйства заводов черной металлургии. Роль доменного и коксового газов в газовом балансе СССР 199
11-6. Газификация твердого топлива 202
11-7. Газификация сернистого мазута 211

Глава двенадцатая. **Тепловые (топливные) балансы промышленных предприятий** 213

12-1. Общие сведения 213
12-2. Тепловой баланс металлургического комбината 214
12-3. Тепловые балансы других промышленных предприятий 219
Литература 221

ПРЕДИСЛОВИЕ

Огневая промышленная теплотехника как отрасль науки и техники изучает вопросы наиболее рационального использования тепла в огнетехнических процессах, протекающих в промышленных печах разного назначения и лежащих в основе производства металла, машин, химических продуктов, строительных материалов, пищевых продуктов и т. д. В промышленных печах расходуются огромные количества разнообразного топлива. Поэтому большое значение имеет повышение тепловой экономичности промышленных печей и правильное использование топлива, являющегося, по образному определению В. И. Ленина, «хлебом промышленности». В настоящей книге основное внимание уделяется вопросам рационального топливоиспользования в печах и вопросам энергетической модернизации печных установок. Газообразное топливо (и в первую очередь природный газ) обеспечивает работу промышленных печей с наилучшими показателями и чаще всего используется в них. Поэтому в книге уделено значительное внимание газоснабжению промышленных предприятий.

При составлении книги автору помогали инж. С. А. Щукин, составивший примеры расчетов, и инж. В. Ф. Фоменков, выполнивший работу по подготовке рукописи. Автор приносит глубокую благодарность проф. Г. А. Матвееву за ценные советы при просмотре рукописи, а также доц. В. В. Мурзакову за научное редактирование и Л. Н. Синельниковой за большую работу по редактированию и подготовке книги к печати.

Автор

ВВЕДЕНИЕ

Высокотемпературные процессы лежат в основе важнейших производств: металла, деталей машин, химических продуктов, строительных и других материалов. Эти процессы осуществляются в промышленных печах, в которых материалам или изделиям придаются свойства, необходимые для конечного продукта или требующиеся для дальнейшей обработки.

Эти процессы протекают при относительно высоких температурах: плавка стали в мартеновских печах при 1 800—2 000 °С, нагрев стальных заготовок в кузнечных печах при 1 300—1 500 °С, обжиг огнеупоров в печах при 1 500—1 800 °С. Еще более высокие температуры создаются в электрических печах.

Большое значение промышленные печи имеют при производстве чугуна и стали на заводах черной металлургии с полным производственным циклом. В *доменных печах* этих заводов производят выплавку чугуна из железных руд. Доменный газ после очистки от пыли используется в качестве топлива в печах и в топках котлов ТЭЦ. Кокс, необходимый для доменных печей, производится коксохимическими заводами или коксовыми цехами металлургических заводов, где в *коксовых печах* (коксовых батареях) перерабатываются коксующиеся каменные угли. При этом получаются в больших количествах коксовый газ и ценные побочные химические продукты: каменноугольная смола, бензол аммиак и сульфат аммония натрия.

Мартеновские печи являются сталеплавильными агрегатами: в них из шихты, состоящей в основном из чугуна, стального лома (скрапа), руды и флюсов, выплавляется сталь. Чугун доставляется из доменного цеха в жидком виде или при работе мартеновских печей на холодной завалке употребляется в чушках. Более производительной является выплавка стали *в конвертерах,* в которых жидкий чугун продувается технически чистым кислородом, при этом углерод в значительном количестве переходит в газ, а марганец, кремний, фосфор и сера — в шлаки. При окислении примесей выделяется так много тепла, что его достаточно для разогрева ванны и покрытия потерь тепла без затраты добавочного топлива. Отходящие газы конвертеров горючи (90% CO и 10% CO_2), имеют очень высокую температуру (1 500—1 800 °С) и сильно загрязнены техиологическим уносом до 125—220 *г/м*^{3}. Работа конвертеров невозможна без улавливания газов, их охлаждения в котлах-охладителях и очистки.

За мартеновскими печами также устанавливаются котлы-утилизаторы, т. к. температура газов за печами очень высока (500—700 °С). Работа печей невозможна без охлаждения металлических деталей и кладки посредством испарительного охлаждения с одновременной выработкой пара, который затем следует использовать для энергетиче-

ских и отопительных целей. Стальные тяжеловесные слитки, отлитые в сталеплавильных цехах в изложницы, поступают в отделение для снятия изложниц, а затем перед прокаткой в обжимных станах (блюмингах и слябингах) нагреваются в печах, называемых *нагревательными колодцами.* После обжатия в блюминге стальные слитки (блюмсы) идут на дальнейшую обработку в заготовочные и сортовые прокатные станы, где путем прокатки получают фасонный прокат — рельсы, двутавровые и швеллерные балки и т. п. Перед каждым станом стальные заготовки подвергаются нагреву в *нагревательных печах.* Стальные листы, стальное литье, трубы и другие стальные изделия подвергаются обработке в *термических печах* для отжига, нормализации и других операций.

Сталеплавильные мартеновские печи лучше всего работают при отоплении их высококалорийным топливом — мазутом, природным или коксовым газом, однако часто применяется и смешанный газ (коксовый газ в смеси с доменным). Нагревательные печи обычно работают на смешанном газе. В связи с этим металлургические заводы имеют сложное *газовое хозяйство,* органически связанное с печами.

В цветной металлургии в плавильных *отражательных печах* выплавляется из медных концентратов полупродукт меди — штейн. Газы уходят из печи с температурой 1280—1 360 °С и сильно загрязнены технологическим уносом — до 200 *г/м*^{3}. Эти газы следует использовать для выработки пара в котлах-утилизаторах и подогрева воздуха. В *шахтных* (ватержакетных) *печах* выплавляются медные и никелевые полупродукты. Эти печи нуждаются в подаче горячего воздуха, и их правильная работа невозможна без испарительного охлаждения рубашки шахты с выработкой пара.

Велико значение промышленных печей на заводах тяжелого, транспортного и энергетического машиностроения. В *чугунолитейных вагранках,* работающих на коксе или литейном антраците, расплавляется чугун, причем химический состав чугуна может быть изменен. Вагранки являются основным видом чугуноплавильных печей, в них переплавляется около 80% всего литейного чугуна. Нагревательные печи употребляются для нагрева стальных слитков перед прессованием. В *термических* печах осуществляется всякого рода термическая обработка стальных изделий (отжиг, нормализация, закалка и отпуск, цементация и т. п.). Кроме перечисленных, на машиностроительных заводах можно встретить и другие типы печей.

На заводах промышленности строительных материалов печи также играют важнейшую роль в производстве. Во *вращающихся печах* производят обжиг цементного клинкера, из которого получается портландцемент. В *стекловаренных печах* из шихты получают стекломассу, которая идет на выработку листового или другого стекла.

В *шахтных* печах обжигают известняк на известь; в *туннельных* и других печах — строительный кирпич, керамические блоки, черепицу, канализационные трубы и другие строительные материалы.

На нефтеперерабатывающих заводах и заводах органического синтеза главными технологическими агрегатами являются *трубчатые печи* для крекинга, пиролиза и других процессов. Сущность крекинга состоит в разложении высокомолекулярных углеводородов на более простые; этот процесс является основой переработки нефтяного сырья в жидкие моторные топлива с получением одновременно нефтяного крекинг-газа. На химических заводах печи играют серьезную роль. Например, при выработке из серного колчедана серной кислоты, имеющей большое значение в народном хозяйстве страны и являющейся одним из основных продуктов химической промышленности, применяются печи с обжигом серного колчедана в плотном или в *«кипящем» слое,* а в *циклонных пе-*

чах — во взвешенном состоянии. В печах с «кипящим» слоем катализаторов осуществляются: процессы окисления (конверсия метана, получение водорода и окиси углерода, окисление аммиака и другие) и процессы гидрирования и дегидрирования (синтез аммиака и др.). Очень большое значение имеют печи в промышленности огнеупорных и абразивных материалов, а также в пищевой промышленности.

Выполняя определенные технологические функции, печи представляют собой сложные теплоэнергетические агрегаты, потребляющие большое количество топлива (главным образом, высокосортного). Потребление топлива печами занимает одно из первых мест в общем топливном балансе страны, и правильное использование топлива в печах представляет важнейшую народнохозяйственную задачу. В Советском Союзе очень многие заводы оборудованы современными печами, хорошо выполняющими свое назначение и имеющими высокие показатели по использованию топлива. Наряду с этим имеется очень много печей, имеющих низкие коэффициенты полезного действия (к. п. д.). До последнего времени, например, мартеновские печи имели, а многие из них и сейчас имеют к. п. д. порядка 20—25%. Вместе с тем благодаря интенсификации хода плавки, лучшей организации производства и использованию потерь тепла некоторые заводы повысили к. п. д. мартеновских печей до 40—50%, т. е. увеличили использование топлива более чем в 2 раза. При современном уровне знаний есть возможность строить печи с высоким к. п. д. Осуществляя регенерацию тепла отходящих газов с подогревом воздуха до высоких температур, используя вторичные энергетические ресурсы, а также применяя энерготехнологическое комбинирование, можно улучшить использование топлива — уменьшить удельные расходы топлива.

Промышленные печи работают чаще всего на природном газе, искусственном газообразном топливе и на мазуте, так как при этих топливах обеспечивается их работа с наилучшими показателями (высокая производительность, высокое качество и невысокая себестоимость продукции, хорошие условия труда) при легком осуществлении автоматического регулирования тепловых процессов. Доменные печи, чугунолитейные вагранки, ватержакетные медеплавильные и другие шахтные печи работают на каменноугольном коксе. Обжиг строительных материалов производится в печах и на твердом топливе — каменном угле, антраците, низкосортных бурых углях, дровах и торфе. Обжиг цементного клинкера (из которого получается путем размола цемент) производится иногда на пылевидном топливе.

Наша страна располагает огромными природными запасами угля, торфа, горючих сланцев, нефти и газа. Роль каждого из этих видов топлива в общем топливном балансе различна. Направление в развитии топливного хозяйства определяется не только требованиями, предъявляемыми к качеству топлива, но и затратами труда на его добычу, переработку и транспортирование, а также стоимостью топлива.

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПЕЧИ

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧАХ

1-1. НАЗНАЧЕНИЕ ПЕЧЕЙ. ОБЩАЯ СХЕМА УСТРОЙСТВА ПЕЧИ. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧЕЙ

В основе многих технологических процессов лежит тепловая обработка материалов и изделий: нагрев и плавление металлов, обжиг строительного и огнеупорного кирпича, обжиг фарфора и других керамических изделий, получение вяжущих материалов (цементного клинкера, извести, гипса), получение стекла, термическая переработка топлива и т. д. Тепловая обработка материалов и изделий осуществляется в технологических или энерготехнологических агрегатах — промышленных печах, в которых материалам или изделиям в условиях относительно высоких температур придаются свойства, необходимые для дальнейшей обработки или для выпуска в качестве конечного продукта. Так, в нагревательных печах стальные слитки или заготовки приобретают повышенную пластичность и текучесть, необходимую для прокатки и ковки. В чугунолитейных вагранках чугун переходит из твердого состояния в жидкое, при котором он хорошо заполняет пустоты форм для отливок. Химический состав чугуна при его расплавлении может быть изменен в зависимости от требований, предъявляемых к литью (серый чугун, жаропрочный чугун и т. д.). В некоторых термических печах стальные изделия нагреваются, а затем охлаждаются по заранее определенному режиму, чем достигается получение определенных механических свойств путем изменения внутренней структуры металла без изменения его химического состава (отжиг, нормализация, закалка и отпуск). В печах для термохимической обработки стальных изделий металл нагревается для того, чтобы облегчить насыщение поверхности металла углеродом (цементация) или азотом (азотизация) или одновременно углеродом и азотом (цианирование).

В печах для тепловой обработки материалов одновременно протекает ряд сложных процессов — газификация и горение топлива, движение дымовых газов в рабочем пространстве, передача тепла от горящего факела и дымовых газов к обрабатываемому материалу (непосредственно или посредством вторичного излучателя — кладки), продвижение тепла от поверхности изделий внутрь, экзотермические и эндотермические процессы при превращении обрабатываемого материала и т. д. Все эти сложные процессы взаимно связаны, их совокупность составляет суммарный процесс тепловой обработки, и они не могут рассматриваться изолированно. Ведущими из этих процессов являются процессы передачи тепла.

Источником тепла в топливных (пламенных) печах является топливо: газ, мазут, угольная пыль, каменноугольный кокс, бурый уголь, каменный уголь и т. д. Химическая энергия топлива при его сжигании превращается в тепловую энергию, носителем которой являются продукты сгорания. В настоящее время, главным образом в черной метал-

лургии, разрабатываются проекты получения тепловой энергии в ядерных промышленных установках.

В электрических печах тепловая энергия получается посредством преобразования в нее электрической энергии. Источником тепла могут быть электрическая дуга (в дуговых печах), электрические нагреватели (в печах сопротивления) или тепло возникает в толще нагреваемых изделий, помещенных в электрическое поле промышленной или большой частоты (в индукционных печах). Ниже будут рассмотрены пламенные печи, а об электрических печах будет дано лишь общее представление.

Гениальный русский ученый М. В. Ломоносов после установления физической сущности теплоты и открытия закона сохранения материи и энергии дал в трактате «О вольном движении воздуха, в рудниках примеченном» (1742 г.) строгое определение причин движения газов в полостях печей. В 1763 г. в труде «Первые основания металлургии или рудных дел» М. В. Ломоносов указал на зависимость хода плавки от свойств руды и топлива, изложил «действие огня в самодуях», т. е. объяснил работу дымовых труб, самодувных печей и т. д., а также высказал мысль об использовании тепла отходящих от печей газов. В 1822 г. французский ученый Фурье изложил теорию распространения тепла внутри твердых тел и дал решения частных случаев нагрева тел в труде «Аналитическая теория тепла». Значительное влияние на развитие печной теплотехники оказали труды выдающегося русского металлурга В. Е. Грум-Гржимайло, опубликовавшего в 1905—1909 гг. *гидравлическую теорию печей*, в которой сформулированы основные принципы построения печей с естественным движением газов. Математическое обоснование этой теории дал И. Г. Есьман (1910 г.). Гидравлическая теория печей положила начало развитию теории печей и сыграла в свое время положительную роль в строительстве печей с естественным движением газов. Однако в дальнейшем, когда появилась необходимость строить быстродействующие печи с принудительным движением газов, она была оставлена, как мешающая дальнейшему развитию печей. Тепловые расчеты печей были применены русским металлургом Н. Е. Скаредовым, положившим начало тепловым расчетам мартеновских печей (1912—1915 гг.).

Дореволюционное печное хозяйство, как и вся промышленность, находилось на низком уровне. Только после Великой Октябрьской социалистической революции, когда под руководством партии советский народ приступил к индустриализации страны, началось широкое строительство печей и интенсивное развитие теории печей. Неоценимым вкладом в теплотехническую науку явились труды акад. М. В. Кирпичева и его сотрудников (А. А. Гухмана, М. А. Михеева, Г. П. Иванцова и др.) по теории подобия физических процессов и моделирования. Значение метода моделирования (в том числе огневого моделирования) очень велико. С помощью этого метода представилось возможным в лабораторных условиях обстоятельно изучить вопросы движения газов, конвективного теплообмена, теплопроводности и сложных комплексных задач по теплообмену в печах. Заслуживают высокой оценки оригинальные работы по теплообмену в печах и по нагреванию и охлаждению тел, выполненные Г. П. Иванцовым, Д. В. Будриным, В. Н. Тимофеевым, Г. М. Кондратьевым, С. Н. Шориным, А. С. Невским и другими советскими учеными.

В настоящее время теория печей, базирующаяся на теории теплообмена, теории тепловых балансов, газомеханики и теории горения топлива, позволяет строить высокопроизводительные и высокоэкономичные печи на заводах различных отраслей промышленности.

Целый ряд теоретических изысканий по теории печей представляет приоритет ученых Советского Союза.

Общая схема устройства печи и назначение ее отдельных элементов. Промышленная печь в общем случае состоит из основных элементов, указанных на рис. 1-1.

В топочном устройстве (топке) химическая энергия топлива превращается в физическое тепло газов, частично передающих его обрабатываемому материалу. В топке могут сжигаться различные виды топлива: газообразное (природный газ, коксовый, генераторный и т. д.), жидкое (мазут) и твердое (каменный и бурый угли, кокс, антрацит, дрова и торф). В зависимости от рода топлива, типа печи, ее назначения и производительности топочное устройство имеет ту или иную конструкцию и размеры.

В рабочем пространстве печи осуществляется заданный технологический процесс (плавление шихты, нагрев различных изделий и т. д.). Материал лежит на *поду* печи, имеющем форму ванны (у плавильных печей) или плоскости (у нагревательных и обжиговых печей). Материал чаще всего перемещается в рабочем пространстве при помощи того или иного транспортного устройства. В плавильных печах шихта неподвижна, но загрузка шихты обязательно механизируется.

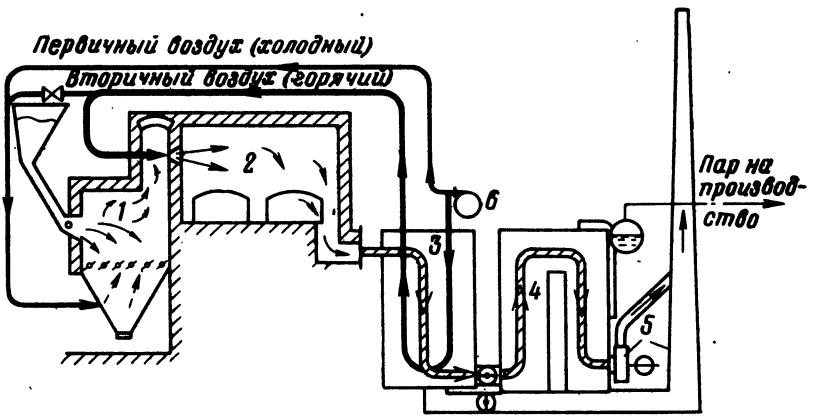


Рис. 1-1. Общая схема устройства печи.

1 — топочное устройство; *2* — рабочее пространство; *3* — регенеративное устройство: *4* — котел-утилизатор; *5* — дымосос; *6* — вентилятор.

Устройство рабочего пространства должно быть таким, чтобы передача тепла от газов к материалу осуществлялась наиболее рациональным способом и в количестве, обеспечивающем требуемую производительность печи. Форма рабочего пространства различна: оно может иметь вид камеры (камерные печи), шахты (шахтные печи), туннеля (туннельные печи) и т. д. В рабочем пространстве непрерывным потоком движутся дымовые газы. Роль движения газов в процессе теплообмена очень велика, и, кроме того, движение газов является средством управления процессами теплообмена и горения. Размеры рабочего пространства зависят от производительности печи и теплового режима ее работы. Например, печи для нагрева стальных заготовок встречаются с площадью пода от 0,25 до 60 $м^2$ и более, а вращающиеся печи для обжига цементного клинкера имеют длину барабана до 150 *м* и более.

Для сохранения высоких температур дымовых газов в рабочем пространстве печи ее стенки выполняют из огнеупорных и теплоизоляционных материалов, являющихся плохими проводниками тепла. Следовательно, охлаждение газов в рабочем пространстве идет в значительной мере за счет полезной отдачи тепла нагреваемому материалу.

Внутренняя поверхность огнеупорной кладки используется как косвенная поверхность нагрева для передачи тепла от газов к материалу лучеиспусканием.

В регенеративном устройстве физическое тепло дымовых газов, уходящих из рабочего пространства печи, частично регенерируется, т. е. передается теплоносителю, направляющемуся снова в рабочее пространство печи. Регенерация осуществляется при помощи воздуха или воздуха и газообразного топлива (если печь работает на газе), подогреваемых теплом отходящих дымовых газов.

При подогреве воздуха и газообразного топлива температура горения топлива повышается, а следовательно, повышается и температура рабочего пространства печи. Во многих случаях достижение температур, необходимых для данного технологического процесса, невозможно без высокого подогрева воздуха и газообразного топлива. Так, например, выплавка стали в мартеновских печах, для осуществления которой температура факела (потока горящих газов) в плавильном пространстве должна составлять 1 800—2 000 °С, была бы невозможна без подогрева воздуха и газа до 1 000—1 200 °С. При отоплении промышленных печей низкокалорийным местным топливом (влажные дрова, торф, бурый уголь) работа их без подогрева воздуха часто даже невозможна. При подогреве газа и воздуха повышается также экономичность работы печи, т. е.

уменьшается относительный (удельный) расход топлива, а к. п. д. соответственно возрастает.

Аппаратами, в которых производится подогрев воздуха и газообразного топлива, являются *регенераторы и рекуператоры.* В обжигательных печах силикатной промышленности тепло, аккумулированное в обожженных изделиях, после завершения обжига (кирпича, цементного клинкера и т. д.) регенерируется при помощи воздуха, поступающего на горение.

Теплоиспользующее устройство служит для использования тепла отходящих газов. Очень часто в этих газах при выходе из рабочего пространства содержится тепла значительно больше, чем требуется для нагрева воздуха и газообразного топлива. В таких случаях устанавливают котлы-утилизаторы для получения пара или нагрева воды, используемых для технологических целей, для отопления и вентиляции производственных цехов и т. д. За счет работы котлов-утилизаторов общая тепловая экономичность установки может быть значительно повышена. На рис. 1-1 котел-утилизатор расположен за рекуператором, но в некоторых случаях выгоднее, наоборот, рекуператор устанавливать за котлом.

Тяговое устройство служит для отвода в атмосферу дымовых газов, а также газообразных продуктов, выделяющихся при обработке материала в печи. Функции тяговых устройств промышленных печей и котельных агрегатов имеют существенное различие. В подавляющем большинстве случаев дымовые газы в рабочем пространстве печи находятся под некоторым небольшим избыточным давлением и их движение в рабочем пространстве печи осуществляется отнюдь не за счет действия тягового устройства (как в котельных установках). Движение дымовых газов за счет разрежения, создаваемого тяговой установкой, как правило, осуществляется только после того, как газы покинут рабочее пространство печи. Тяга может быть естественной (дымовая труба) или осуществляется при помощи дымососов прямого или косвенного действия.

Дутьевое устройство состоит из дутьевых вентиляторов, подающих необходимый для горения воздух к горелкам, форсункам, под колосники и т. д.

Механическое оборудование служит для механизации загрузки шихты (например, завалочные машины мартеновских печей), для перемещения нагреваемых деталей в рабочем пространстве печи (конвейеры, толкатели, выталкиватели) и т. д. Механизация печей позволяет сократить до минимума затраты труда на обслуживание печей, увеличить их производительность и создать наиболее благоприятные условия для обслуживающего персонала. В настоящее время печи, как правило, строят механизированные.

Процессы, протекающие в печах, очень сложны и поэтому для правильного их осуществления печи снабжаются приборами теплового контроля. Кроме того, печи часто оборудуются приборами для автоматического регулирования отдельных операций (например, для регулирования горения топлива) или всего процесса в целом.

Описанная выше тепловая схема промышленной печи является общей, но не единственной. В некоторых случаях тепло уходящих газов используется для предварительного подогрева материала, нагреваемого в печи, вследствие чего из-за низкой температуры уходящих дымовых газов отпадает необходимость в использовании их тепла. Иногда отсутствует надобность в рекуператорах, так как подогрев воздуха осуществляется внутри печи за счет использования тепла остывающих изделий, и т. д.

Классификация промышленных печей. В промышленности работает множество печей, имеющих самое различное назначение: выплавка чугуна из руд и обжиг цементного клинкера, выплавка стали из шихты и выпечка хлеба и т. д. Классифицировать печи в силу их большого разнообразия трудно, и хотя был ряд предложений, но еще нет общепринятой системы классификации. Несмотря на различие печей в них есть общие черты, которые и могут быть положены в основу классификации; например, они могут быть классифицированы следующим образом.

По роду производства и их технологическому назначению различают: металлургические печи — доменные для выплавки чугуна из руд, сталеплавильные, нагревательные прокатные, термические; печи машиностроительных заводов — литейные вагранки, нагревательные, кузнечные, термические; цементообжигательные печи; печи для обжига керамических изделий и т. д.

По конструктивным и тепловым схемам и режимно-организационным признакам различают печи: по форме рабочего пространства — камерные, многокамерные, кольцевые, карусельные, туннельные, шахтные, вращающиеся барабанные и др.; по режимно-организационным признакам — печи непрерывного действия, периодического действия; по степени механизации — печи немеханизированные, механизированные.

По теплоэнергетическим и аэродинамическим признакам различают: по способу теплообмена — печи высокотемпературные с радиационным теплообменом, низкотемпературные с конвективным теплообменом; печи с теплообменом в неподвижном слое, в кипящем слое, во взвешенном слое; печи с теплообменом в циклонной камере (циклонные печи); по способу регенерации тепла — регенеративные и рекуперативные печи; по способу отопления — пламенные (топливные) и электрические печи; по виду топлива и способу его сжигания — мазутные печи, газовые и т. п.; по способу нагрева — печи с прямым нагревом (дымовые газы соприкасаются с изделиями) и печи с косвенным нагревом (дымовые газы отделены от изделий стенками).

В печах одновременно протекают различные процессы горения, теплообмена, диффузии и газодинамики, но ведущими являются теплообменные процессы, поэтому классификация печей по теплообмену — одна из важнейших.

1-2. ОСНОВНЫЕ УСЛОВИЯ РАЗВИТИЯ ОГНЕТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧАХ

Процессы тепловой обработки материалов так же разнообразны, как разнообразны сами материалы, подвергающиеся обработке. Тепловая обработка протекает на определенном температурном уровне, обеспечивающем развитие технологического процесса. Например, жидкая сталь выпускается из печей с температурой 1 550—1 650 °С, стальные слитки нагреваются перед прокаткой до 1 250 °С, чугун выпускается из вагранки при 1 300—1 400 °С и т. д. Разумеется, чтобы довести металл до указанных температур и при том обеспечить необходимую производительность агрегата, следует в рабочем пространстве развивать гораздо более высокие температуры; так, факел в мартеновской печи имеет температуру около 2 000 °С, раскаленный кокс в горне доменной печи примерно 1 800 °С и т. д. [1]. *Достижение необходимых температур является первым и основным условием развития технологического процесса.* Получить высокие температуры, необходимые для плавки металлов или нагрева их, для обжига огнеупорных материалов и т. п., не так легко, для этого требуется определенная техника сжигания топлива в том или ином агрегате. Для создания высоких температур в горне доменной печи сжигают кокс определенного качества (кондиционный кокс), а воздух, необходимый для горения, нагревают в регенеративных воздухоподогревателях-кауперах до температуры около 1 000—1 200 °С. Часто воздух обогащают кислородом — содержание кислорода увеличивают с 21% по объему (в естественном воздухе) до 30—35% и более; содержание балластного азота соответственно снижается. В мартеновских печах для достижения высокой температуры воздух, а часто и газообразное топливо, идущие на горение, нагревают в регенеративном устройстве до 1 000—1 200 °С за счет тепла отходящих из рабочей камеры газов; тем самым реализуется принцип регенерации тепла. Факел в печи должен обладать высокой лучеиспускательной (радиационной) способностью, так как в противном случае трудно или невозможно осуществить плавку. Лучеиспускательная способность каждого участка факела (плотность собственного излучения) $E_ф$ определяется его степенью черноты $\varepsilon_ф$ и абсолютной температурой в четвертой степени:

$$E_ф = C_0 \varepsilon_ф \cdot 10^{-8} T_ф^4, \qquad (1\text{-}1)$$

где C_0 — коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела.

[1] Значения температур приведены в табл. 6-3.

Чем больше концентрация излучающих газов и сажистого углерода в факеле, тем больше степень черноты (при одних и тех же толщине излучающего слоя и температуре газов) и тем интенсивнее излучает факел. При сжигании топлив, не дающих светящегося факела (например, природного газа или генераторного газа), для придания факелу светимости его карбюрируют путем дополнительного сжигания жидких топлив, богатых высокомолекулярными углеводородами (смолы, мазута). Разлагаясь, они выделяют дисперсный углерод, который придает факелу светимость. При сжигании природного газа иногда устраивают *самокарбюрацию,* о чем сказано ниже. В нагревательных, обжиговых и прочих высокотемпературных печах чаще всего не требуется светящегося факела и его степень черноты определяется концентрацией трехатомных газов CO_2, SO_2, H_2O. Топливо стараются быстро и полностью сжечь с минимальным избытком воздуха. Такой способ обогрева печей является наиболее экономичным.

Встречаются случаи, когда в рабочем пространстве требуется высокая степень равномерности распределения температур во избежание большого брака обжигаемых (нагреваемых) изделий. Так, например, при обжиге в камерных печах керамических изделий (фарфор, фаянс, карборунд, динас, шамот и пр.) температурная неравномерность в больших печах не должна превышать 20—40 °С. В таких случаях недопустимо, чтобы в одной части рабочей камеры печи располагалось сильно излучающее пламя, а в другой части двигался поток прозрачных газов с законченными реакциями горения, быстро остывающих при движении между изделиями, так как при этом изделия в отношении нагрева будут находиться в резко различных условиях. Во избежание этого горение ведут таким образом, чтобы пламя было растянутым, что удается добиться регулированием процесса смешения горючих газов с вторичным воздухом (замедлением смешения).

Придание факелу (пламени) определенных радиационных свойств является вторым условием развития высокотемпературного технологического процесса в пламенных печах. В печах требуется поддерживать газовую атмосферу с определенными свойствами — окислительную, нейтральную или восстановительную. *Окислительная атмосфера,* например, имеет место в сталеплавильных агрегатах, где из расплавленного металла выжигаются углерод и другие элементы. Наоборот, если при нагреве металла в кузнечных, прокатных и термических печах имеет место окисление, то оно не только приводит к потере металла в окалину, но и вызывает необходимость затрачивать труд на удаление окалины с поверхности, а также сопровождается увеличением расхода топлива из-за ухудшения теплопередачи. Окисление металла вызывают содержащиеся в продуктах сгорания кислород O_2, двуокись углерода CO_2, сернистый газ SO_2 и водяные пары H_2O. Наряду с окислением в процессе нагрева имеет место и обезуглероживание поверхностного слоя стали, вызываемое взаимодействием водяных паров, двуокиси углерода и кислорода с металлом.

Обезуглероживание, так же как и угар металла, наносит ущерб производству. В современных печах для термообработки рабочее пространство печи заполняется специальными *защитными газами,* исключающими возможность окисления и обезуглероживания поверхности изделий, при этом передача тепла от дымовых газов к изделиям осуществляется радиационным путем через стенки муфелей или радиационных труб, изолирующих печную атмосферу от греющих дымовых газов (рис. 1-2). На угар металла, помимо концентрации газов, влияет длительность нагрева. При скоростном нагреве потери металла в окалину резко сокращаются, и поэтому стараются нагрев вести с наибольшей скоростью, допустимой для данного металла. В последнее время

внедряются печи для *безокислительного нагрева стали* перед ковкой и штамповкой, принцип действия которых показан на рис. 1-2. Природный газ сжигается в рабочей камере печи с коэффициентом расхода воздуха $\alpha \approx 0{,}5$. Метан, являющийся главнейшей составляющей природного газа, сжигается по суммарной реакции

$$4CH_4 + 4O_2 = CO_2 + 3CO + 3H_2O + 5H_2. \qquad (1\text{-}2)$$

Получаются продукты неполного горения приблизительно следующего объемного состава: $CO_2 = 2{,}5\%$; $CO = 12{,}1\%$; $H_2O = 12{,}1\%$; $H_2 = 17{,}4\%$ и $N_2 = 55{,}8$; теплота сгорания газа $Q_н^c = 3{,}44$ *Мдж/м*³. Из теории равновесия реакций окисления железа следует, что окисление стали не должно происходить при отношении $CO/CO_2 \geqslant 3$ и $H_2/H_2O \geqslant 1{,}35$. Это имеет место для газа указанного состава — следовательно, безокислительный нагрев будет обеспечен. Для получения в печи необходимой температуры следует подогревать первичный воздух в рекуператоре до 800 °С. Газы из рабочего пространства направляются в камеру дожигания, где и сгорают, отдавая затем тепло в рекуператоре на нагрев воздуха.

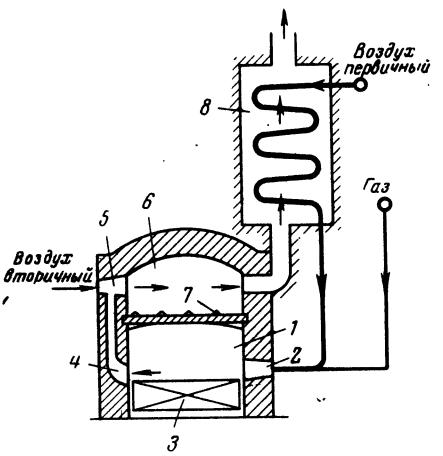


Рис. 1-2. Принцип действия камерной печи для безокислительного нагрева.
1 — рабочая камера; *2* — горелка; *3* — нагреваемые детали; *4* — отвод защитного газа; *5* — подача вторичного воздуха; *6* — камера догорания; *7* — теплопроводный свод; *8* — рекуператор.

В доменных печах помимо достижения высоких температур необходимо получать достаточное количество окиси углерода и водорода, требуемое для восстановления железа из руды, — состав газовой атмосферы играет в данном процессе большую роль. Почти всегда состав газов факела и продуктов полного горения, помимо чисто физических свойств (излучательная способность и пр.), существенно влияет на химические реакции, протекающие в агрегатах. Поэтому *третьим условием развития технологического процесса является получение определенных свойств факела и газовой атмосферы в печах.* Следует заметить, что здесь перечислены только основные условия, которые в различных печах реализуются по-разному.

1-3. ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Принципиальные схемы печей и их конструкция зависят: от вида технологического процесса и характера производства; требований, предъявляемых к качеству тепловой обработки; масштабов производства; рода энергии, используемой в печах (для пламенных печей от вида и качества топлива). Лучшей схемой пламенной промышленной печи будет такая, которая обеспечивает высокую удельную производительность (на 1 *м*³ объема или на 1 *м*² площади пода в единицу времени) при высоком качестве тепловой обработки материала и малых удельных расходах топлива, т. е. расходах топлива, отнесенных к единице количества исходного материала или готовой продукции.

Высокая производительность определяется, во-первых, поточностью технологического процесса — устройством непрерывно действующих печных агрегатов и, во-вторых, интенсивностью теплообменных и массооб-

менных процессов, протекающих в рабочих пространствах печей, что достигается разными путями:

1) повышением температуры в печах путем высокотемпературного нагрева воздуха, идущего на горение топлива. Это чаще всего осуществляется в плавильных печах, где температура факела часто не имеет ограничений и лимитируется только стойкостью огнеупоров. Например, в регенеративных печах для плавки стали, стекла и других материалов температура подогрева воздуха достигает 1 000—1 200 °С, что сильно повышает температуру факела при сжигании мазута или природного газа. При использовании низкокалорийных газов — доменного и генераторного — подогревают не только воздух, но и газ;

2) использованием высокой турбулизации факела (потока продуктов сгорания) в «кипящем» слое измельченного сырья — в печах с кипящим слоем;

3) использованием центробежного эффекта закручивания потока воздуха и газов, что сильно интенсифицирует процессы тепло- и массообмена за счет тесного контакта вихревого потока газов и мелкозернистого материала и турбулизации пограничного слоя газов у частиц — в циклонных печах;

4) использованием высокоскоростных свойств потока раскаленных газов (при «атакующих» горелках) — в печах высокоскоростного нагрева;

5) увеличением температуры кладки за счет интенсивного нагрева ее поверхности особыми плоскопламенными горелками с последующей передачей тепла на изделия;

6) увеличением давления в рабочем пространстве печного агрегата — в доменных печах для выплавки чугуна из железных руд и в других.

Выше приведены главные приемы интенсификации тепло- и массообмена. Как было сказано, первым условием хорошей работы печных агрегатов является непрерывность процесса нагрева; это реализуется в печах при непрерывном движении материала сквозь рабочие пространства печей: за счет гравитационных сил (в шахтных печах); при помощи конвейеров разной конструкции; за счет проталкивания специальными толкателями изделий, загруженных на вагонетках (в туннельных печах) или лежащих на глиссажных трубах (стальные заготовки в нагревательных печах). Ввиду большого разнообразия технологических процессов нет единых решений в приемах, обеспечивающих высокие производственные показатели печей, — эти приемы разнообразны и зависят от конкретных особенностей.

Ниже приводятся некоторые примеры конструкции печей. Эти примеры расположены по признаку использования тепла в рабочем пространстве печей: тепла продуктов сгорания — для нагрева изделий и тепла остывающих изделий или материала для нагрева воздуха, идущего на сгорание топлива. Сначала рассмотрим непрерывно действующие печи с полной регенерацией тепла в рабочем пространстве (туннельные, шахтные и вращающиеся печи), не требующие установки особых регенеративных теплообменников, а затем печи с регенеративными устройствами (регенераторами или рекуператорами).

Туннельные печи

При технологических процессах обжига строительных материалов: вяжущих материалов (цемента, извести), глиняного кирпича, огнеупоров (шамотных, магнезитовых, динасовых), фаянсовых, фарфоровых и др. изделий — материал нагревается до высоких температур, обеспечивающих процессы обжига, а затем охлаждается воздухом, так как эти материалы не подвержены окислению. Нагрев и охлаждение ведутся по определенному режиму в зависимости от рода изделий.

В данном случае можно осуществить полную регенерацию тепла как газов, отходящих из зоны горения (путем нагрева изделий, движущихся навстречу потоку газов),

так и обожженных изделий (путем нагревания воздуха, идущего на сгорание и отбираемого на сторону). Температура уходящих из печи газов невысокая (150—250 °С). Туннельная печь представляет непрерывно действующий агрегат, не требующий особого регенеративного устройства в виде рекуператора или регенератора. Схема туннельной печи показана на рис. 1-3. Печь представляет собой длинный (до 80—120 *м*) туннель, по которому движется поезд из вагонеток, нагруженных обрабатываемыми изделиями. Металлические остовы вагонеток футеруются огнеупорным и изоляционным кирпичом. Состав вагонеток периодически проталкивается посредством толкателя. Рабочее пространство печи отсоединяется от атмосферы при помощи песочных затворов. Печь по длине разбивается на *зону подогрева, зону высоких температур* и *зону охлаждения.*

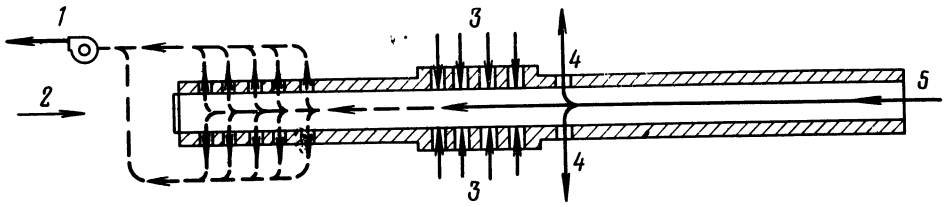


Рис. 1-3. Схематический план туннельной печи прямого действия с распределенным отбором продуктов горения.

1 — продукты горения; *2* — загрузка; *3* — топливо; *4* — избыток охлаждающего воздуха; *5* — воздух для охлаждения.

Топливо сжигается в топках, причем необходимый для горения воздух поступает из зоны охлаждения, где он подогревается за счет тепла остывающих изделий.

Продукты горения из топок поступают в рабочее пространство туннеля и движутся навстречу медленно перемещающимся изделиям, отдавая им тепло. Степень использования тепла дымовых газов зависит от длины зоны подогрева и интенсивности теплоотдачи от газов к изделиям.

Физическое тепло нагретых изделий используется для нагрева воздуха, причем чаще всего передача тепла от изделий к воздуху осуществляется путем непосредственного контакта. Горячий воздух из зоны охлаждения идет в топки и для горения топлива, некоторая часть воздуха проходит непосредственно по туннелю в зону горения и служит для дожигания еще не сгоревших дымовых газов.

Принципиальная схема туннельной печи удовлетворяет большинству требований, предъявляемых к лучшей тепловой схеме (высокая степень регенерации тепла обожженных изделий, достаточно глубокое охлаждение дымовых газов), и печь имеет расход топлива в 1,5—2 раза меньший, чем периодически действующая камерная печь того же назначения. По такому же принципу, что и туннельная печь, работают кольцевые и многокамерные печи, применяемые в силикатной промышленности.

Шахтные печи

Рабочее пространство шахтной печи представляет собой шахту прямоугольного, круглого или овального сечения, заполненную шихтой. К шахтным печам относятся доменные печи для выплавки чугуна из железных руд, ватержакеты для выплавки медного или никелевого полуфабриката из руд, известково-обжигательные печи, печи для обжига различных огнеупорных материалов (шамота, магнезита, доломита), чугунолитейные вагранки и другие печи.

По способу отопления шахтные печи разделяются на *пересыпные* и *печи с выносными топками.* Типичным примером пересыпной печи является доменная печь, описанная ниже в гл. 11. Топливом для пересыпных печей является кокс (доменные печи) или антрацит — в других шахтных печах. Загрузка сырья и топлива производится слоями поочередно, причем крайне важно, чтобы сырье и топливо распределялись равномерно по сечению печи.

Подъемник, необходимый для загрузки материала в печь, используется и для подачи топлива.

В печах пересыпного типа в рабочем пространстве одновременно с прогревом материала идет процесс газификации топлива. Этот процесс необходим в печах, в которых осуществляется восстановление веществ из окислов (например, восстановление железа из руды в доменных печах), и связан с наличием в колошниковых газах горючих газов — окиси углерода и водорода. Колошниковый газ доменных печей (*доменный газ*) после соответствующей очистки от пыли используется как топливо для печей и котлов; **газы от чугунолитейных вагранок и других пересыпных печей получаются с весьма малой теплотой сгорания и использовать их сложнее, но возможно.**

Выносными полугазовыми топками оборудуются печи для обжига вяжущих материалов и огнеупоров; в таких топках сжигаются топлива с большим выходом летучих веществ (торф, бурый уголь и пр.).

На рис. 1-4 показана шахтная печь для обжига доломита, порошок которого употребляется для наварки подов основных мартеновских печей, а также для производства доломитового кирпича. Печь эта — пересыпного типа, топливом является смесь коксика с антрацитом. Шахта имеет кожух, выполненный из толстого железа и футерованный шамотовым и магнезитовым кирпичом (магнезитовый кирпич внутри). Материал и топливо подаются скиповым подъемником в загрузочный аппарат и далее в рабочее пространство печи. Газы отводятся из шахты в атмосферу. Кусковой сырой доломит и топливо загружаются равномерными слоями, причем на три объема сырья расходуется один объем топлива. Температура обжига доломита составляет 1 600—1 700 °С, температура уходящих газов 250—300 °С. Воздух, необходимый для сгорания топлива, нагнетается вентилятором под вращающуюся колосниковую решетку (служащую для механической разгрузки обожженного доломита), подогревается за счет тепла остывающего материала до 350—400 °С и вступает далее в зону наибольших температур. Дымовые газы движутся навстречу опускающемуся вниз материалу и отдают ему физическое тепло. Недостатком печи является значительная потеря тепла с негоревшими газами

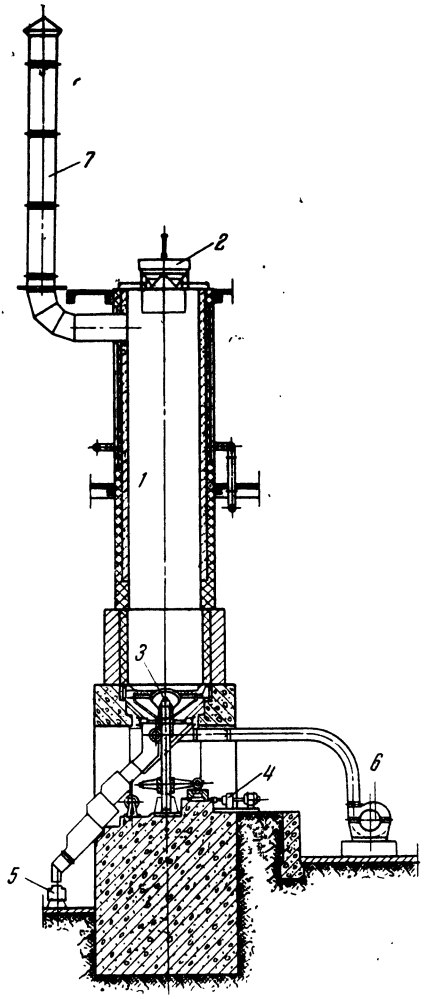


Рис. 1-4. Шахтная печь для обжига доломита.

1 — рабочее пространство; *2* — загрузочный аппарат; *3* — разгрузочный аппарат; *4* — привод разгрузочного аппарата; *5* — транспортер для обожженного материала; *6* — воздуходувка; *7* — труба для отвода газов в атмосферу.

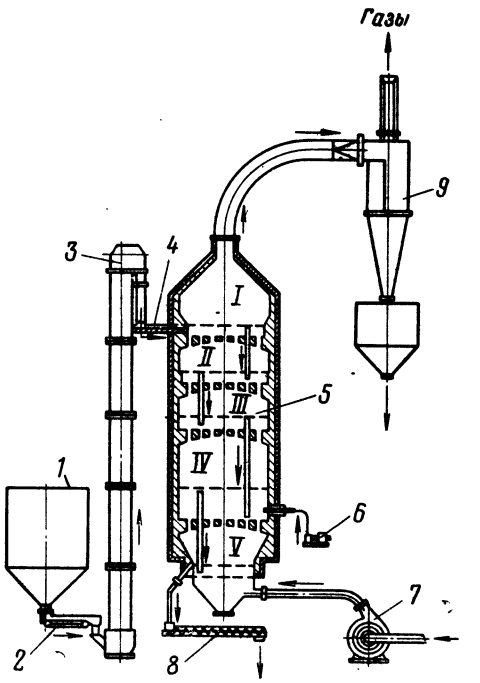


Рис. 1-5. Печь для обжига извести в кипящем слое.

1 — бункер для измельченного известняка; *2* — шнек; *3* — элеватор; *4* — шнек; *5* — печь; *6* — мазутный насос; *7* — дутьевой вентилятор; *8* — шнек выгрузки; *9* — циклон; *I—III* — зоны подготовки; *IV* — зона кальцинирования; *V* — зона охлаждения.

(главным образом, окисью углерода), получающимися в результате частичной газификации топлива.

Печи для обжига в кипящем слое

Печи с обжигом мелкозернистого материала применяются в металлургии (обжиг концентратов и др.), в химической промышленности (обжиг серного колчедана, суперфосфатов и др). На рис. 1-5 показана печь для обжига измельченного известняка в кипящем слое на известь по реакции

$$CaCO_3 \longrightarrow CaO + CO_2. \qquad (1\text{-}3)$$

Печь имеет пять решетчатых сводов, прямоточно продуваемых потоком горячих газов от сжигания мазута и потоком воздуха в зоне охлаждения. Горячий воздух из зоны охлаждения используется для сгорания топлива. Зернистый материал, находящийся в состоянии псевдоожижения, перетекает с полки на полку через трубки.

Благодаря интенсивному перемешиванию и большой турбулизации потока процесс теплопередачи идет очень интенсивно и печь характеризуется высокой удельной производительностью. Недостатком кипящего слоя является истирание частиц и запыление газов, вследствие чего приходится прибегать к очистке газов.

Вращающиеся печи

Вращающаяся печь, изображенная на рис. 1-6, предназначена для обжига цементного клинкера. Она представляет собой стальной цилиндр, футерованный внутри (в зоне высоких гемпературр) огнеупором, наклоненный слегка к горизонту (уклон приблизительно 4%). Сырье поступает в верхний конец печи и движется, пересыпаясь, навстречу дымовым газам. На нижнем торце печи установлена дальнобойная (длиннофакельная) горелка, к которой подается горячий воздух, нагретый в холодильнике за счет охлаждения обожженного клинкера. Холодильник представляет собой ряд барабанов, связанных с печью, в которые поступает при вращении печи раскаленный клинкер, продуваемый воздухом. При движении материала он сначала проходит зону подсушки, где температура газов $t_г$ снижается с 900 до 300 °С, а материал нагревается до 200 °С. В зоне подогрева ($t_г$ = = 1 200÷600 °С) заметных химических реакций в материале не протекает. В зоне высоких температур ($t_г$ = = 1 500÷1 200 °С) материал нагревается до 1 000 °С и в нем происходят дегидратация глины, диссоциация карбонатов и другие химические процессы. За счет экзотермических реакций происходит образование силикатов и алюминатов кальция. Затем идет спекание ($t_г$ = = 1 600÷1 700 °С) и, наконец, охлаждение материала в холодильнике. Высокое качество продукции и большая агрегат-

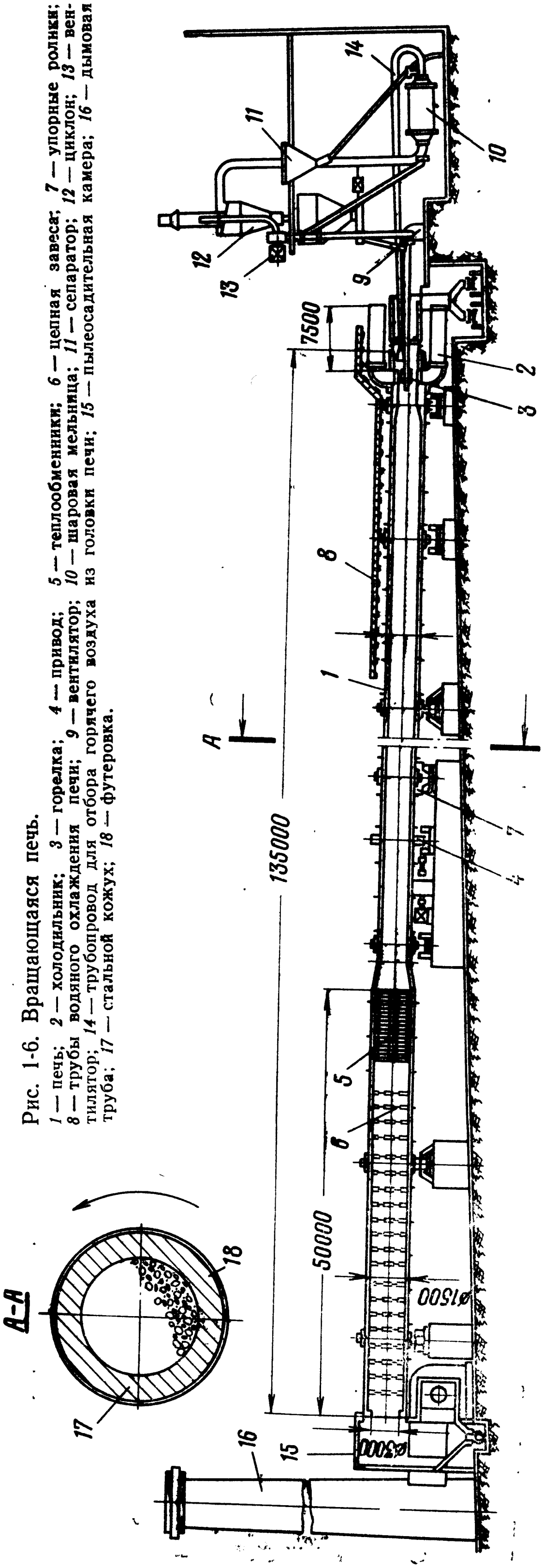


Рис. 1-6. Вращающаяся печь.
1 — печь; *2* — холодильник; *3* — горелка; *4* — привод; *5* — теплообменники; *6* — цепная завеса; *7* — упорные ролики; *8* — трубы водяного охлаждения печи; *9* — вентилятор; *10* — шаровая мельница; *11* — сепаратор; *12* — циклон; *13* — вентилятор; *14* — трубопровод для отбора горячего воздуха из головки печи; *15* — пылеосадительная камера; *16* — дымовая труба; *17* — стальной кожух; *18* — футеровка.

ная мощность сделали вращающиеся печи основными агрегатами в производстве цемента.

Небольшие вращающиеся печи применяются для обжига керамзита (наполнитель бетона), а также обжига гипса, извести и других материалов.

Печи для нагрева металла перед прокаткой и ковкой

В печах для нагрева стали нельзя устроить зону охлаждения, так как металл из печи выдается с высокой температурой (до 1 250 °С), и поэтому ограничиваются наряду с зоной высокой температуры только зоной подогрева.

Методические нагревательные печи

Методические нагревательные печи получили широкое распространение на заводах черной металлургии, на машиностроительных и других заводах для нагрева слитков и заготовок перед прокаткой и ковкой. Такие печи предназначаются для нагрева стандартных (однотипных) изделий и поэтому пригодны при массовом поточном производстве, в то время как для нагрева разнохарактерных изделий с различным режимом нагрева применяются камерные печи.

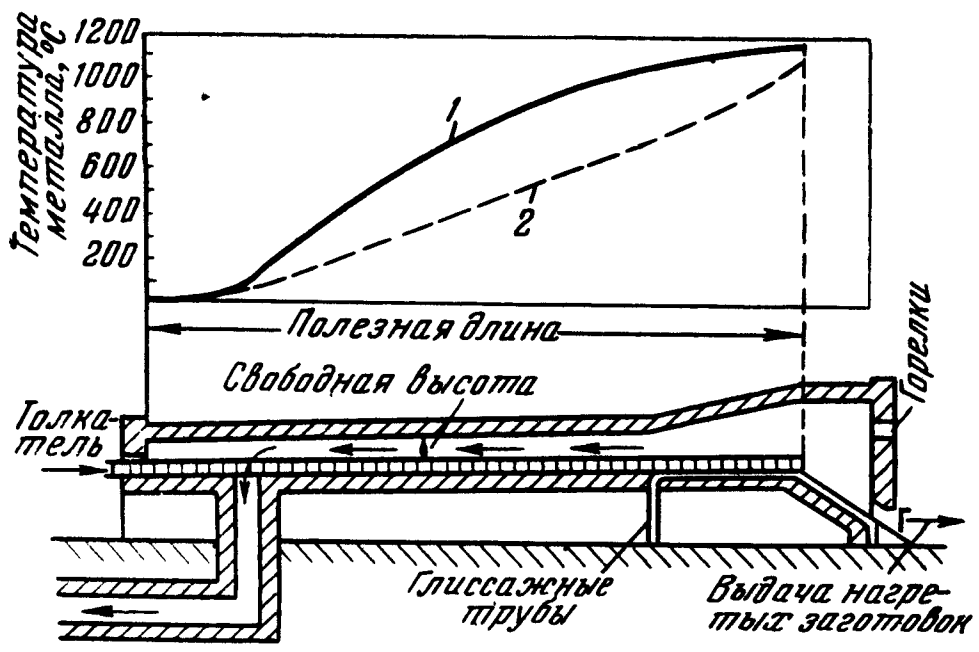


Рис. 1-7. Схема методической печи для одностороннего нагрева тонких заготовок.

1 — температура верхней поверхности металла; *2* — температура нижней поверхности металла.

На рис. 1-7 представлена методическая печь для нагрева стальных слитков перед прокаткой. Печь состоит из двух зон — зоны высокой температуры (называемой сварочной камерой) и подогревательной зоны, в которой заготовки подогреваются за счет тепла дымовых газов, поступающих из сварочной камеры. Сварочная камера снабжена форсунками или горелками; подогревательная зона топочных устройств не имеет.

Нагреваемые заготовки движутся сплошной стопкой по поду печи на специальных стальных направляющих, называемых шинами, укрепляемых на глухом поду. Дымовые газы движутся навстречу заготовкам, прогревая их с одной стороны. Изделия продвигаются по шинам при помощи толкателя и выходят нагретыми до 1 200—1 250 °С с противоположного торца или через боковое рабочее окно (в этом случае при помощи автоматического выталкивателя). Нагрев крупных заготовок (сечением более 200×200 *мм*) необходимо вести с двух сторон, направляя поток дымовых газов как сверху, так и снизу изделий (рис. 1-8). В этом случае кроме верхних форсунок устанавливаются также нижние; от последних

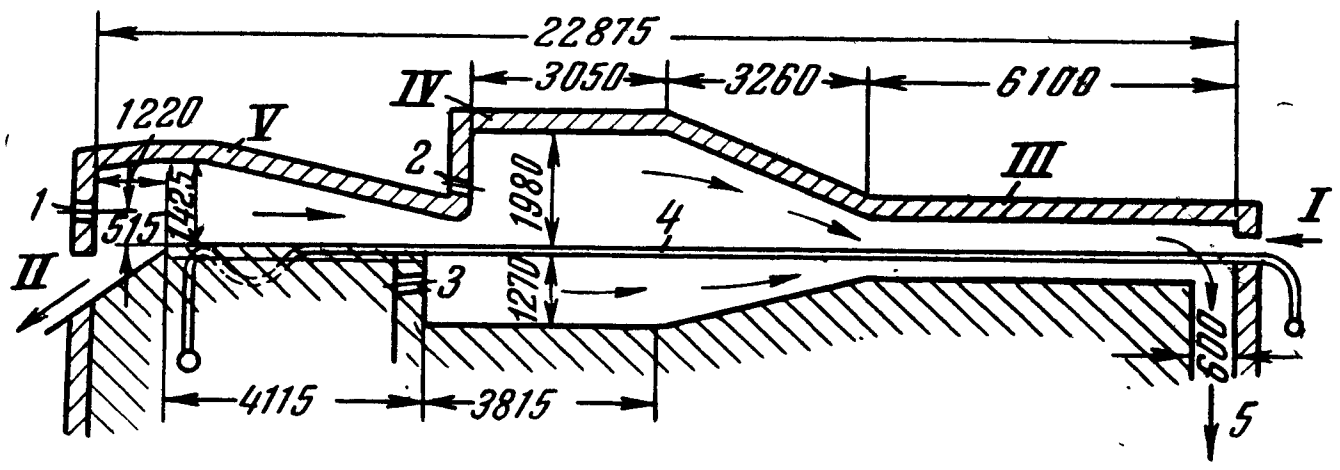


Рис. 1-8. Схема методической печи для двустороннего нагрева заготовок.

1 — верхние горелки зоны выдержки; *2* — верхние горелки сварочной зоны; *3* — нижние горелки сварочной зоны; *4* — глиссажные трубы, охлаждаемые водой; *5* — отвод газов в теплоиспользующее устройство; *I* — подача заготовок в печь толкателем; *II* — выдача нагретых заготовок из печи на рольганг; *III* — зона подогрева; *IV* — сварочная зона; *V* — зона выдержки.

пламя направляется ниже нагреваемых изделий. Двусторонний нагрев резко ускоряет процесс нагрева металла и освобождает рабочих-нагревальщиков от необходимости переворачивать (кантовать) слитки. Печь, изображенная на рис. 1-8, имеет помимо сварочной и подогревательной зон зону выдержки, в которой изделия догреваются при постоянной температуре поверхности металла; таким образом, устраняется разность температур между поверхностью и серединой слитков.

При двустороннем нагреве заготовки движутся по водоохлаждаемым шинам, называемым глиссажными трубами; последние опираются на специальные поперечные трубчатые конструкции, также охлаждаемые водой. В настоящее время применяется также испарительное охлаждение металлических деталей таких печей.

Температура в сварочной камере достигает обычно 1 400—1 500 °С, а в подогревательной зоне падает от 1 300—1 450 °С до 1 000—800 °С.

Таким образом, методическая печь является примером печи, в которой тепло дымовых газов, уходящих из сварочной камеры, используется для предварительного подогрева изделий. Перепад энтальпии газов в самой печи здесь является наиболее значительным. Путем подогрева воздуха в рекуператоре (и подогрева газа, если печь работает на газообразном топливе) можно значительно поднять начальную энтальпию дымовых газов. Технологический к. п. д. печи может достигать 60—65%.

Камерные нагревательные и плавильные печи

Камерные печи получили большое распространение в промышленности в тех случаях, когда невозможно или трудно организовать нагрев в печах проходного типа, т. е. когда материал или однотипные изделия непрерывным потоком проходят сквозь печь. Камерные печи теоретически характеризуются равномерным распределением температур в объеме и поэтому такие печи применяются в качестве нагревательных — для нагрева крупных стальных слитков и т. д., а также используются как плавильные печи. Примером конструкции камерной печи является рекуперативный колодец с горелкой, расположенной в центре подины (рис. 1-9). Такие колодцы объединяются в группы и служат для нагрева тяжелых стальных слитков перед прокаткой. Слитки при помощи клещевого крана устанавливаются на поду и подвергаются всестороннему нагреву. Рабочая камера колодца *1* имеет футерованную крышку *2*, которая перемещается специальным краном *3*, приподнимается и отводится в сторону. Крышка уплотняется при работе колодца песочным затвором. Керамические рекуператоры *6*, расположенные по бокам, имеют конструкцию, изображенную на рис. 1-9.

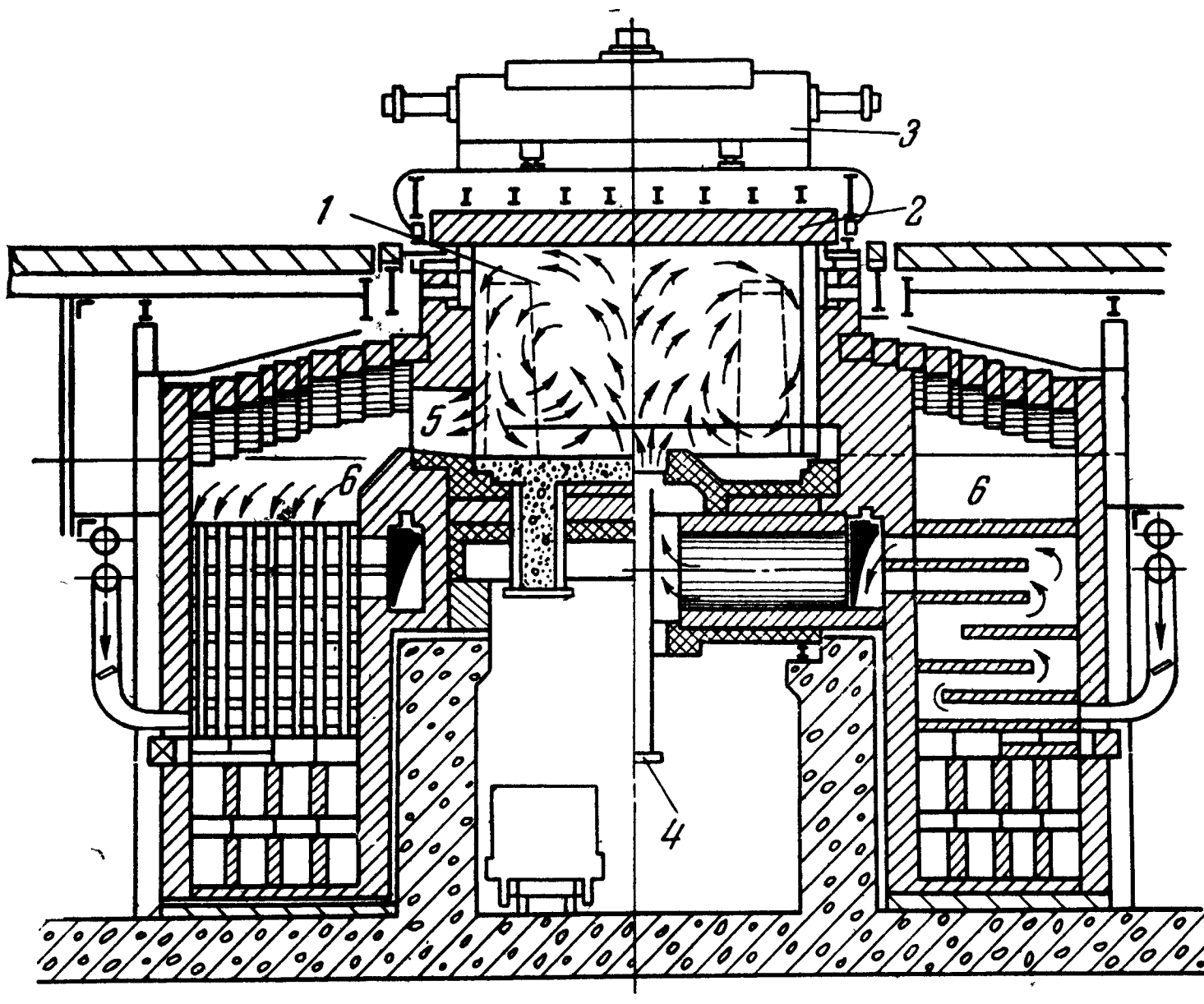


Рис. 1-9. Рекуперативный колодец с горелкой, расположенной в центре подины.

1 — рабочая камера; *2* — футерованная крышка; *3* — напольный кран для перемещения крышек; *4* — газовая горелка; *5* — дымоотводящие каналы; *6* — керамические рекуператоры.

Газ к горелке *4* подается без подогрева, а воздух — подогретым в рекуператоре до 600—800 °С. В рабочем пространстве струя, выходящая из горелки, возбуждает циркуляцию газов во всем объеме, что способствует равномерному нагреву слитков.

Сталеплавильные мартеновские печи

Примером плавильных камерных печей является мартеновская сталеплавильная печь, представленная на рис. 1-10 и 1-11. Шихта, подлежащая расплавлению, загружается в печь через рабочие окна при помощи завалочной машины. Плавильное пространство

печи перекрыто сверху главным сводом, выложенным из высокоогнеупорного хромомагнезитового или динасового кирпича. Передняя и задняя стенки печи имеют особую форму, обеспечивающую наибольшую устойчивость и сток расплавленного металла и шлака в ванну.

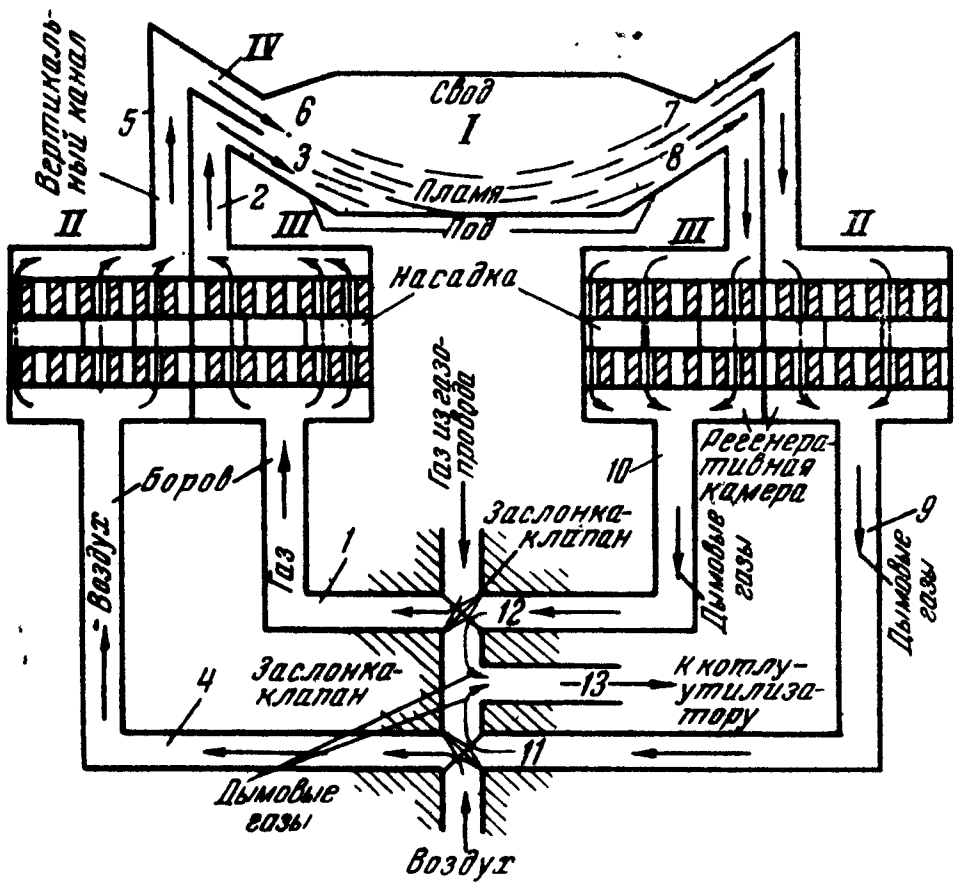


Рис. 1-10. Схема мартеновской сталеплавильной печи, работающей на смешанном коксодоменном газе.

I — плавильное пространство; *II* — воздушные регенераторы (одна пара); *III* — газовые регенераторы (одна пара); *IV* — головка печи (2 шт.); *1* — подача холодного газа в регенератор для подогрева; *2* — подача горячего газа из регенератора в головку печи; *3* — выход газа в плавильное пространство; *4* — подача холодного воздуха в регенератор; *5* — подача горячего воздуха в головку; *6* — выход горячего воздуха в плавильное пространство; *7* — отвод раскаленных дымовых газов в воздушный регенератор; *8* — отвод раскаленных дымовых газов в газовый регенератор; *9* — отвод дымовых газов, остывших в воздушном регенераторе; *10* — отвод дымовых газов, остывших в газовом регенераторе; *11* и *12* — перекидные устройства (для переключения направления газов); *13* — отвод дымовых газов к котлу-утилизатору.

Под этих печей выложен в виде ванны, имеющей в нижней точке выпускное отверстие (летку), через которое расплавленная сталь выпускается в футерованный ковш.

Температура стали при выпуске весьма высока ($t''_м = 1\,550—1\,650$ °С) и для обеспечения достаточно интенсивной передачи тепла от пламени к шихте в печи необходимо развить очень высокую температуру факела ($t_ф = 1\,850 \div 1\,900$ °С). Для ускорения реакций окисления углерода и других примесей жидкую ванну продувают кислородом, чем сокращается время плавки. Главный свод печи является косвенным излучателем тепла; нагреваясь от газов, он, подобно рефлектору, посылает тепловые лучи на ванну печи. При этом температура свода достигает 1 650—1 680 °С, т. е. становится близкой к температуре плавления огнеупорной кладки.

Дымовые газы покидают плавильное пространство с температурой 1 750—1 850 °С. Высокой температуры в печи возможно достигнуть только при высоком подогреве воздуха, поступающего на горение, и высоком подогреве газа (если печь работает на смеси коксового и доменного газов). Обычно температура подогрева воздуха составляет 1 000—1 200 и газа 900—1 000°С. Если печь работает на высококалорийном топливе — мазуте или природном газе, то подогревают только воздух (до указанной температуры). Подогрев воздуха и

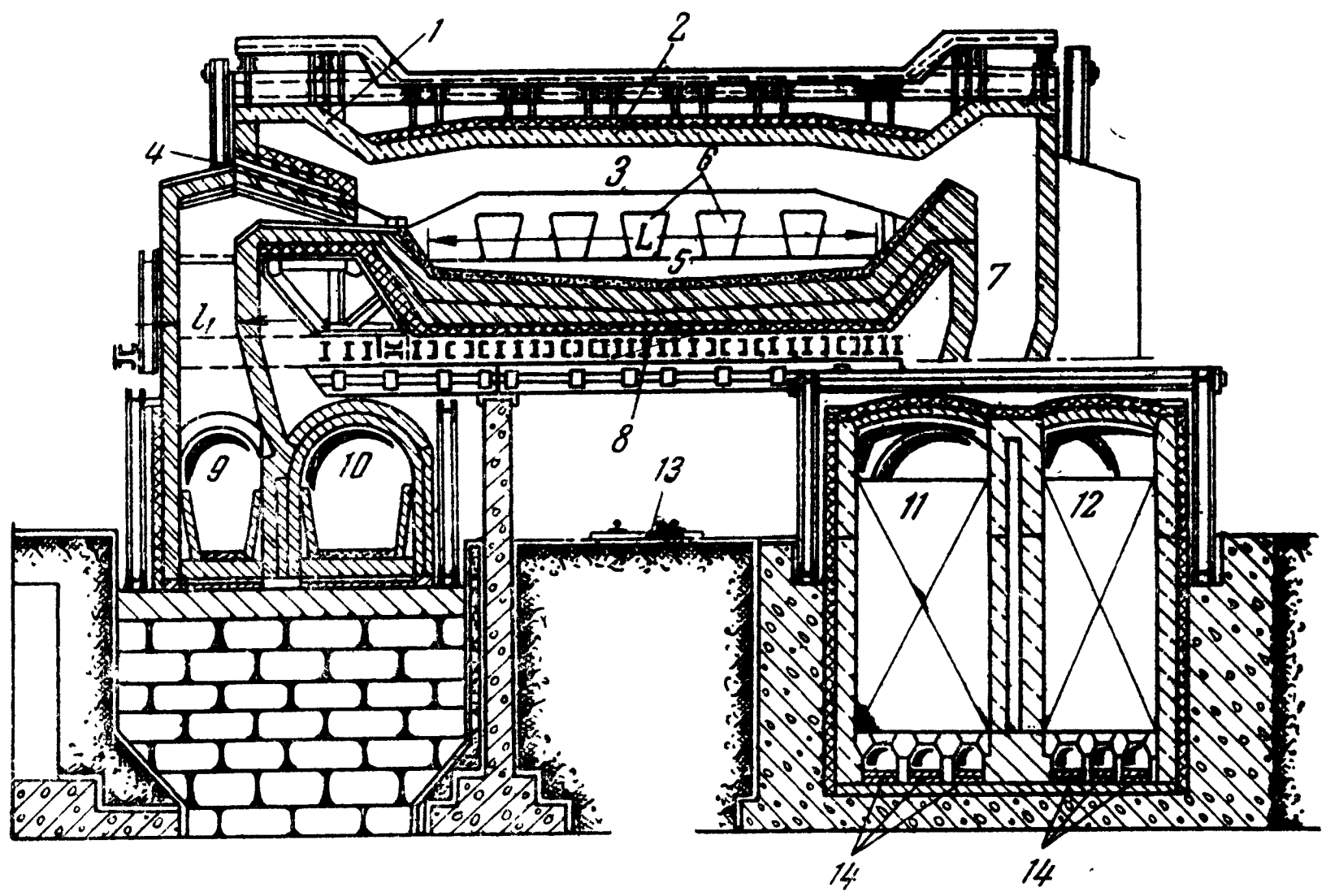


Рис. 1-11. Мартеновская сталеплавильная печь,

1 — свод головки; *2* — главный свод; *3* — рабочее пространство; *4* — кессонного сопла; *5* — ванна; *6* — завалочные окна; *7* — вертикальный воздушный шлаковик: *11* — воздушный регенератор; *12* — газовый регенератор; *13* — путь *16* — свод регенератора; *17* — поднасадочные арки.

газа до таких высоких температур в настоящее время осуществляется в регенераторах, причем при подогреве только воздуха устанавливается одна пара регенераторов, а при подогреве газа и воздуха — две пары регенераторов. Регенераторы располагаются под печью и соединяются с плавильным пространством при помощи вертикальных каналов и головок. Головки при газовом отоплении играют роль горелок — в них нагретое газообразное топливо, поступающее из газовых регенераторов, смешивается с горячим воздухом, подаваемым из воздушных генераторов. При помощи головок факелу придается определенное направление на ванну, чем достигается *настильность пламени,* т. е. его движение непосредственно над расплавляемой шихтой. В настоящее время для отопления мартеновских печей используется природный газ, при сжигании которого в факеле не происходит образования сажистого углерода; факел без принятия специальных мер был бы прозрачным и не обеспечивал бы достаточной величины плотности собственного излучения факела $E_ф$, определяемой степенью черноты факела $\varepsilon_ф$ и его абсолютной температурой $T_ф$ в четвертой степени:

$$E_ф = C_0 \cdot 10^{-8} \varepsilon_ф T_ф^4. \qquad (1\text{-}4)$$

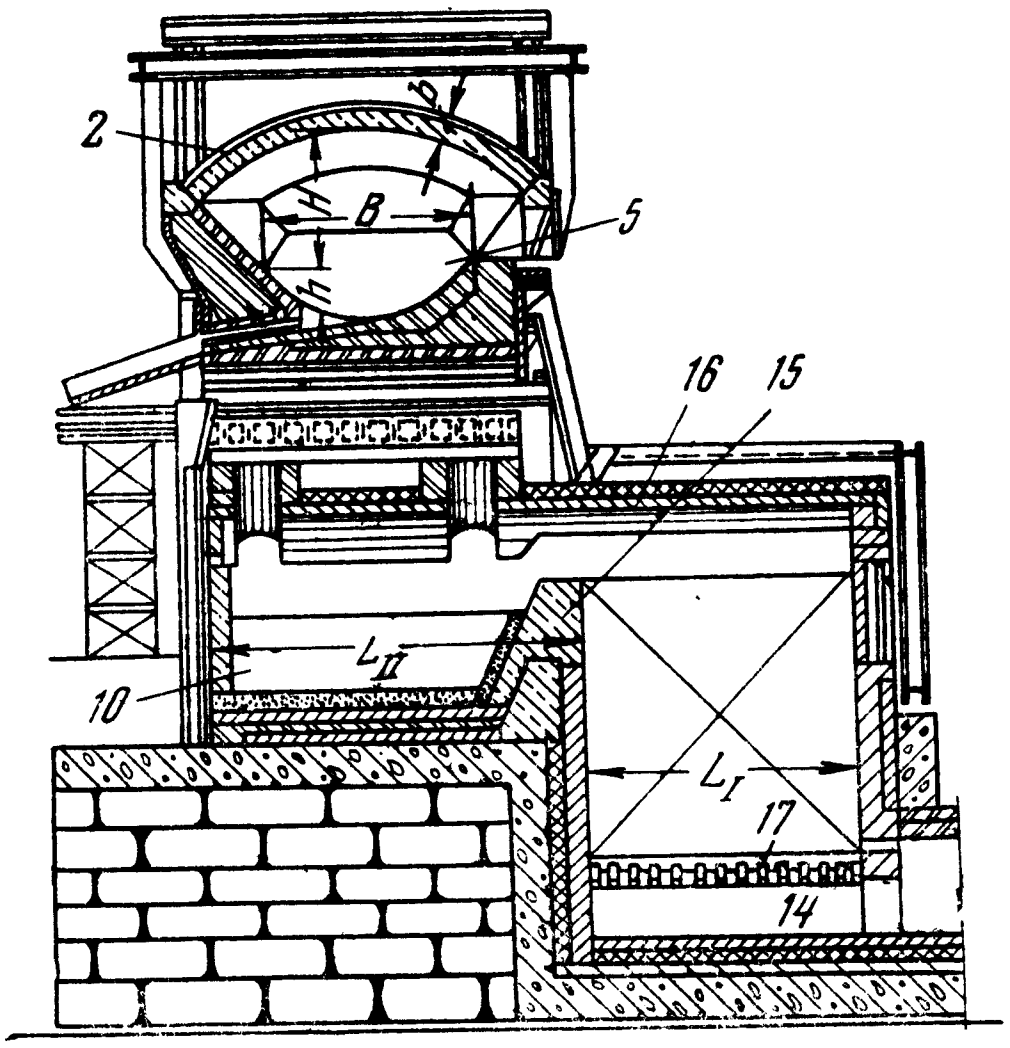
Поскольку дальнейшее повышение температуры факела лимитировано работой регенераторов и стойкостью огнеупоров, стараются увеличить степень черноты факела путем карбюрации его добавкой смолы или мазута, при сжигании которых образуется сажистый углерод. Расход мазута составляет 20—30% по расходу тепла, а количество сажи в углемазутном факеле составляет 3—5% массы мазута. Другим способом является *самокарбюрация* природного газа в вертикальных каналах путем термического разложения части углеводородных газов с выделением сажи. Сажеобразование удобно осуществляется в специальных аппаратах — реформаторах, в которых некоторая часть природного газа сжигается с недостатком воздуха.

Температура газов, уходящих из регенеративной насадки, высока (500—700 °С), и поэтому для более полного использования их тепла устанавливают паровые котлы-утилизаторы. В настоящее время взамен водяного охлаждения металлических элементов печи устраивается испарительное охлаждение. Каждый охлаждаемый элемент представляет собой испарительную поверхность с естественной или принудительной циркуляцией; получаемый пар используется для отопительных или для энергетических целей. Современные мартеновские печи могут иметь энергетический к. п. д. 50—60% вместо имевших место прежде 15—20%.

В настоящее время для интенсификации мартеновских печей в ванны подается кислород, что сильно сокращает продолжительность плавки (на 20—30%).

Отражательные плавильные печи

На заводах цветной металлургии применяются отражательные печи для выплавки из концентратов медной руды промежуточного продукта, называемого *штейном.* Отражательные печи применяются также и для переплавки и рафинирования различных металлов, например чугуна, бронзы, самолетного алюминиевого лома и т. п.



работающая на смешанном коксодоменном газе.

(водоохлаждаемая металлическая конструкция, поддерживающая кладку газоканал; *8* — подина; *9* — газовый шлаковик (пылеуловитель); *10* — воздушный для шлаковых ковшей; *14* — поднасадочные каналы; *15* — перевальная стенка;

Плавильное пространство в медеплавильных отражательных печах (рис. 1-12) имеет длину 30—50 *м*. В нижней части его имеется ванна, куда загружается шихта, а сверху оно перекрыто сводом. Свод играет весьма существенную роль в передаче тепла от факела к ванне. Медеплавильные печи отапливаются высококалорийным топливом — мазутом, угольной пылью и природным газом. Форсунки или горелки располагаются с торца, дымовые газы движутся вдоль плавильного пространства и покидают его с противоположной стороны.

Шихта загружается в печь сверху при помощи ряда воронок, расположенных по обоим краям свода; воронки перекрываются автоматически действующими заслонками (мигалками). Ванна печи в течение всего времени работы заполнена жидким штейном и шлаком, которые раздельно периодически выпускаются из печи. Жидкий штейн выпускается в ковши, направляемые при помощи крана в конвертерный цех для переработки на черновую медь.

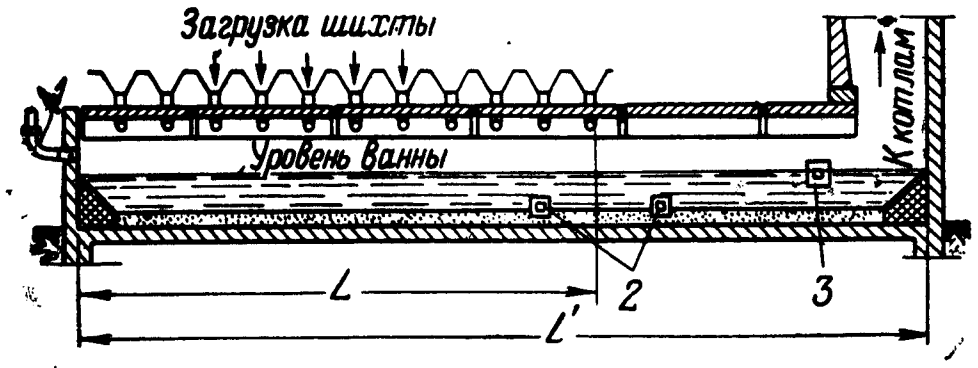


Рис. 1-12. Схематический продольный разрез медеплавильной отражательной печи.

1 — горелки; *2* — выпуск штейна; *3* — выпуск шлака; *L* — длина плавильной зоны; *L'* — полная длина ванны.

В отличие от камерной печи, в которой везде поддерживается приблизительно одинаковая высокая температура, в отражательных печах температура изменяется по длине плавильного пространства. Сначала на расстоянии 2—3 *м* от форсунок (горелок) создается повышение температуры до 1 400—1 500 °С, затем к концу плавильного пространства печи температуру постепенно понижают до 1 300—1 250 °С. Температура содержимого ванны по длине практически одинакова.

Поскольку температура по длине плавильного пространства распределяется неравномерно, интенсивность расплавления шихты по его длине тоже неравномерна. В зоне высоких температур величина *проплава* шихты (измеряемая в тоннах на 1 $м^2$ пода в сутки) значительно превышает величину проплава в конце печи. Температура в конце печи 1 150 °С является минимальной, при которой целесообразно вести процесс расплавления шихты.

В отражательной печи для технологической цели используется значительный перепад энтальпии дымовых газов. Для увеличения этого перепада следует повышать начальную температуру факела путем подогрева воздуха, идущего на сгорание топлива с минимальным избытком воздуха, и устранения вредных присосов воздуха в плавильном пространстве печи.

Дымовые газы, уходящие из печи с температурой примерно 1 100—1 200 °С, сильно загрязнены технологической пылью — пылесодержание их доходит до 100—200 $г/м^3$. Часть пыли находится в размягченном состоянии и может шлаковать поверхности нагрева теплоиспользующей установки. Поэтому непосредственно за печью устанавливается котел-утилизатор с экраном-шлакогранулятором. Посредством последнего резко снижается температура газов еще до конвективной поверхности котла, и частички шлака затвердевают (гранулируются). В настоящее время применяется следующая тепловая схема отражательной печи. За печью устанавливается паровой котел-утилизатор, использующий перепад температуры газов приблизительно от 1 250 до 500 °С. Далее устанавливается противоточный рекуператор для подогрева воздуха, идущего в печь, до 350—450 °С. Температура дымовых газов за рекуператором может быть доведена до 170—200 °С. Однако более целесообразна другая схема — с высокотемпературным автономным воздухоподогревателем, о чем подробнее сказано в гл. 7.

Технологический к. п. д. отражательной медеплавильной печи обычно равен 15—20%, а энергетический к. п. д. печи с котлом-утилизатором и рекуператором достигает 65—75%. К сожалению, на заводах цветной металлургии встречаются еще печи без утилизации тепла дымовых газов, уходящих из плавильного пространства.

Циклонные обжиговые и плавильные печи

Высокая интенсивность горения топлива в циклонных предтопках мощных котельных агрегатов вызвала интерес к детальному изучению циклонного процесса для определения возможности использования его преимущества для технологических целей во многих производствах — для нагрева мелкозернистых сырых материалов при обжиге, а также при плавлении руд.

На рис. 1-13 показана принципиальная схема циклонной печи с верхним отводом продуктов горения. Мелкодисперсное сырье подается сверху, а топливо (жидкое, газообразное или пылевидное) и воздух вводятся в циклон тангенциально, чем достигается закручивание факела, несущего взвесь сырья. Центробежный эффект и сепарация твердых и жидких частиц осуществляются в основном струями воздуха, входящими в циклон со скоростью до 120—180 *м/сек*. Частицы материала, захваченные газовым потоком, под действием центробежной силы отбрасываются к периферии, совершая движение по сложной траектории и пересекая газовый поток. При этом частицы, благодаря высокой турбулизации потока, очень большим относительным скоростям (до 50—150 *м/сек*) и

высокой температуре факела, очень быстро нагреваются. Например, частицы размером 50—100 *мкм* успевают пройти требующуюся тепловую обработку за сотые доли секунды. Плавящиеся частицы материала прилипают к жидкой пленке, стекающей вниз по цилиндрической поверхности стенок циклона, получая дополнительное тепло не только за счет излучения факела, но и путем конвекции. Последняя в силу больших скоростей потока играет большую роль в теплообмене между газами и жидкой пленкой.

После штопорообразного движения вниз в направлении оси циклона газы поворачивают на 180° и уходят вверх через центральную трубу, причем такой поворот способствует хорошей сепарации твердых и жидких частиц, в силу чего унос невелик и составляет 5—10%. Газы направляются для использования их тепла в радиационно-конвективный рекуператор, в котором воздух нагревается до 600—800 °С.

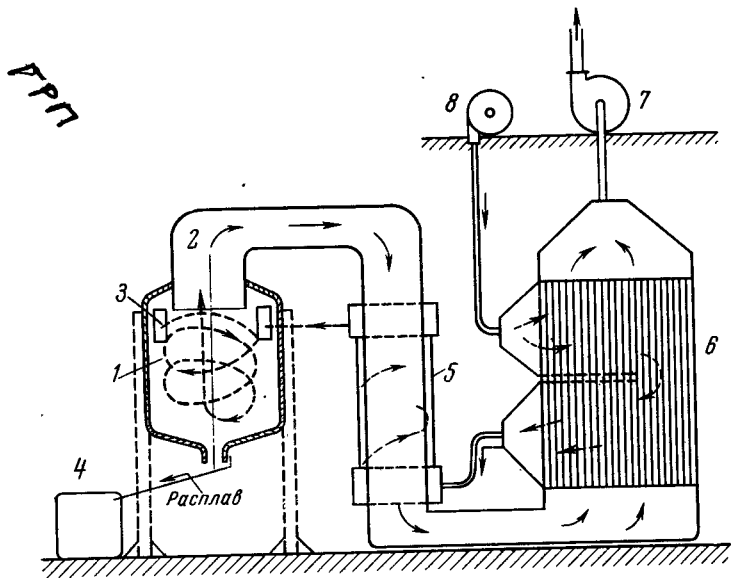


Рис. 1-13. Принципиальная схема циклонной печи с верхним отводом газов.

1 — циклониая камера; *2* — центральная труба; *3* — тангенциальный ввод топлива и воздуха; *4* — гранулятор расплава; *5* — радиацнонный рекуператор; *6* — конвективный рекуператор; *7* — дымосос; *8* — дутьевой вентилятор.

В циклонных печах принципиально возможен обжиг разных материалов: серного колчедаиа с целью получения сернистых газов при производстве серной кислоты, магнезиальных фосфатов с целью обесфторивания при производстве фосфорных удобрений, каолина и т. д.

Недостатком циклоиных печей являются большой вынос технологической пыли, а также абразивный износ кладки.

Строительство печей

Для строительства печей кроме обычных материалов (стальной прокат разных фасонов, трубы, цемент, глиняный строительный кирпич и т. д.) применяются *огнеупорные материалы,* так как внутренняя сторона кладки подвержена воздействию высоких температур, а также химическому действию жидких шлаков, расплавленных металлов и других реагентов. В условиях производственной эксплуатации кладка испытывает механические и термические напряжения, в ней образуются трещины, снижающие газоплотность печи. Чтобы предохранить кладку от распора и укрепить гарнитуру, ставятся металлические *каркасы.* Одновременно кладка должна хорошо сохранять тепло (обладать малой теплопроводностью), что достигается применением в качестве промежуточных слоев легковесных огнеупоров, диатомитового изоляционного кирпича и изоляционной засыпки.

Материалы для кладки выбираются такие, чтобы они хорошо выдерживали воздействия высоких температур (огнеупорность), колебания температур (термостойкость), давление свода и стен (механическая прочность), химическое воздействие (химическая устойчивость), истирание движущимися материалами. Огнеупоры выпускаются в виде нормального кирпича и фасонных изделий, удобных для кладки. Огнеупорные изделия при их изготовлении формуются, отформованный сырец подвергается сушке, а затем обжигу в специальных печах. В зависимости от *огнеупорности* (о которой судят по началу оплавления углов кирпича) различают: огнеупорные изделия (огнеупорность от 1 580 до 1 770 °С), высокоогнеупорные (от 1770 до 2 000 °С) и изделия высшей огнеупорности (выше 2 000 °С). Кладка печи работает под нагрузкой, поэтому важной характеристикой огнеупоров является *температура начала деформации под нагрузкой* (обычно ее берут равной 2 *кгс/см²*). Высокая огнеупорность может ограничиваться малой нагрузкой в горячем состоянии, которая часто определяет предельную рабочую температуру.

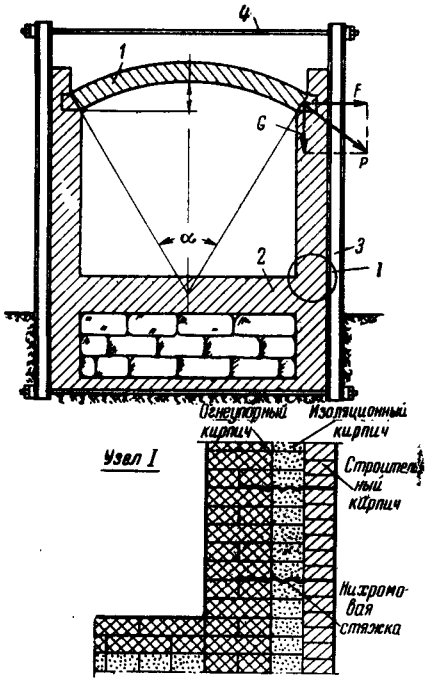


Рис. 1-14. Кладка печи.
1 — свод печи; *2* — под; *3* — стальные стойки; *4* — стяжки.

По химико-минералогическому составу и технологии производства огнеупоры делятся на *алюмосиликатные* — шамотные и высокоглиноземистые, *кремнеземистые* — динасовые, *магнезиальные* — магнезитовые и доломитовые, *хромистые* — хромистые и хромомагнезитовые, *углеродистые* — графитовые, а также *цирконистые*.

Наибольшее распространение благодаря невысокой стоимости имеют шамотные огнеупоры, содержащие Al_2O_3 от 30 до 45%, изготовляемые из огнеупорной глины и шамота (обожженная огнеупорная глина); их огнеупорность составляет 1 580—1 730 °С в зависимости от класса, а рабочая температура от 1 250 до 1 400 °С; они удовлетворительно выдерживают колебания температур и устойчивы против основных шлаков. Шамотные огнеупоры используются при кладке всякого рода печей, топок котлоагрегатов и т. д.

Динасовые огнеупоры содержат не менее 93% SiO_2. Сырьем для них служат кварциты; огнеупорность динаса составляет 1 690—1 710 °С, а предельная рабочая температура 1 600 °С, он плохо переносит колебания температур, но хорошо сопротивляется действию основных шлаков. Динас применяется при кладке мартеновских, коксовых, стекловаренных и других печей непрерывного действия.

Магнезитовые огнеупоры содержат не менее 85% MgO, их огнеупорность около 2 000 °С, применяются они при температурах до 1 650—1 700 °С для кладки подов и ванн металлургических печей. Они хорошо сопротивляются воздействию кислых шлаков и окислов железа, но термостойкость магнезита мала. Применяется также талькомагнезитовый кирпич. Хромомагнезитовые огнеупоры имеют высокую огнеупорность, удовлетворительную термостойкость и сопротивляемость против основных и железистых шлаков. Они идут на изготовление сводов мартеновских печей, регенераторов, шлаковиков и т. д.

Для тепловой изоляции потребляется *диатомитовый кирпич,* изготовляемый из диатомита — легкой горной породы, состоящей из мельчайших ракушек, содержащих пузырьки воздуха (до $1 \cdot 10^6$ ракушек в 1 $см^3$ породы). Такой кирпич выдерживает температуру не выше 900 °С.

Кладка ведется на огнеупорном растворе. На рис. 1-14 показана методика кладки печи. В кладку стен включена перевязка кирпича с прослойкой диатомитового кирпича, свод выполнен из фасонного кирпича, под выложен кирпичом «на ребро». Свод давит на стены с силой P, которую можно разложить на F и G. Сила F стремится сдвинуть кладку и должна быть воспринята металлическим каркасом.

1-4. ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ КОМБИНИРОВАНИЕ

Энерготехнологическое комбинирование заключается в правильном сочетании технологии и энергетики в одной энерготехнологической установке или агрегате.

Отбор пара на производство из теплофикационных турбин ТЭЦ представляет пример высокой тепловой экономичности при комбинированной выработке электроэнергии и технологического пара. Ниже рассмотрен ряд примеров энерготехнологического комбинирования. В гл. 11 описано энерготехнологическое использование топлива с высоким выходом летучих веществ, когда из топлива путем полукоксования отгоняются смола и другие ценные сырьевые продукты. В этом случае котельные агрегаты ТЭЦ могли бы работать на полукоксе. В этой же главе описана установка для сухого тушения раскаленного каменноугольного кокса, выдаваемого коксовой печью. Вырабатываемый котлом-утилизатором пар с давлением 40 *бар* и температурой 450 °С используется в турбинах ТЭЦ. В гл. 8 рассмотрены котлы-утилизаторы, использующие тепло газов, уходящих с температурой выше 500 °С из мартеновских и других печей. Пар из котлов-утилизаторов используется в турбинах ТЭЦ. В системах испарительного охлаждения доменных, мартеновских и других печей также может получаться пар энергетических параметров.

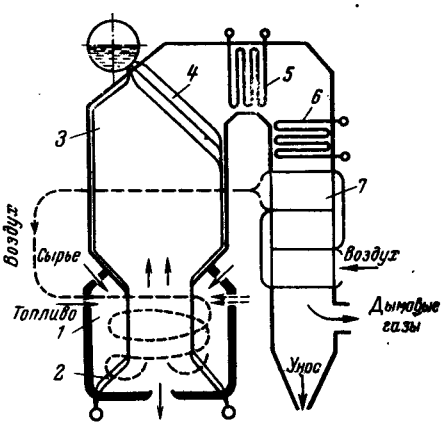


Рис. 1-15. Компоновка циклониой энерготехиологической устаиовки.

1 — циклон; *2* — шлакосепаратор; *3* — камера охлаждения; *4* — фестон; *5* — пароперегреватель; *6* — водяной экономайзер; *7* — воздухоподогреватель.

Энерготехнологическое комбинирование позволяет по-новому решать организацию технологических процессов, увеличить их удельную производительность и единичные мощности. Примером такого решения может быть циклонная энерготехнологическая установка, изображенная на рис. 1-15. В этой установке в циклонной печи осуществляется тот или иной технологический процесс, требующий для своего осуществления высоких температур. Уходящие газы с очень высокой температурой входят в камеру охлаждения, отдавая тепло на выработку пара экранным поверхностям нагрева котла и далее — его конвективным поверхностям нагрева. В воздухоподогревателе подогревается воздух, поступающий в циклон. Циклонная печь в данном случае играет роль топки котельного агрегата, вырабатывающего пар для турбин ТЭЦ.

1-5. ВАРИАНТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОПЛИВА В ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧАХ

Промышленные печи работают на природном газе, на искусственных горючих газах, на жидком топливе (мазуте), на пылевидном и твердом топливах. Современные доменные печи, как было указано, работают на каменноугольном коксе. В былое время они работали на древесном угле. На других видах твердого топлива доменные печи работать удовлетворительно не могут. По своему принципу действия они являются шахтными печами со слоевым сжиганием кокса, но в современных печах для экономии дорогого кокса и для улучшения технологического процесса одновременно с коксом сжигается природный газ или мазут.

Мартеновские сталеплавильные печи наиболее эффективно работают на мазуте, а также на природном или других высококалорийных газах. По своему устройству они не могут работать на кусковом твердом топливе. Следует отметить, что в СССР и в США имеется опыт работы небольших мартеновских печей с пылеугольным отоплением, но из-за трудностей эксплуатации пылеугольное отопление мартеновских печей распространения не получило.

Из приведенных примеров видно, что есть печи, которые по своей конструкции и по принципу действия могут работать только на определенных видах топлива. Как правило, если печь работает на мазуте, то она может работать и на высококалорийном газе. Печи для обжига строительного кирпича, черепицы и другой керамики работают чаще всего на твердом топливе. В других случаях печи могут хорошо работать на разных топливах. В таких случаях вопрос выбора топлива определяется технико-экономическими соображениями или возможностями снабжения топливом данного предприятия.

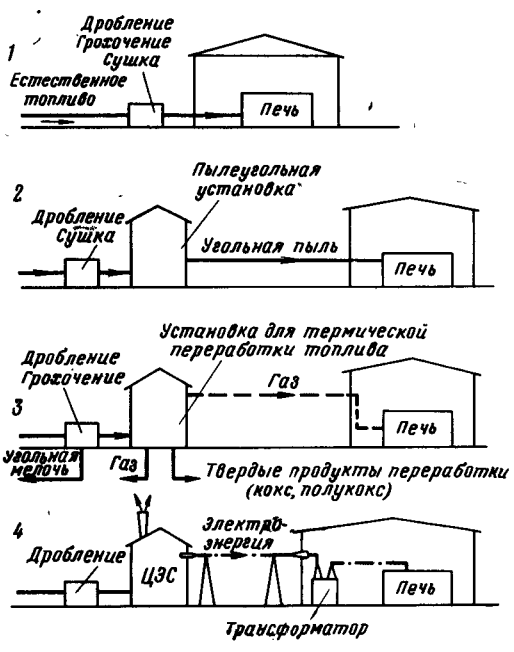


Рис. 1-16. Различные схемы использоваиия твердого топлива в печах.

Рассмотрим общие схемы использования твердого топлива, представленные на рис. 1-16.

По первой схеме природное твердое топливо непосредственно используется в печи путем сжигания в слоевых топках. Перед сжиганием оно подвергается механической переработке или какой-либо другой подготовке, позволяющей увеличить степень использования его в печи: сушке, дроблению, грохочению и пр. Так, например, при использовании дров целесообразно организовать естественную сушку их в теплое время года, создав для этого необходимый запас дров, и снижать их влажность с 50—55% (влажность свежесрубленной древесины) до 25—35%. Практика показала, что искусственная сушка дров является сложной, дорогостоящей, а поэтому нецелесообразной. В отдельных случаях практикуется разделка древесины на щепу при помощи специальных машин (чиперов) с последующей искусственной сушкой щепы теплом дымовых газов, уходящих от печи. Бурый каменный уголь перед сжига-

нием подвергается дроблению с одновременным удалением мелочи посредством грохочения. В отдельных случаях измельченное твердое топливо смешивается с обжигаемым продуктом. Это топливо в процессе обжига выгорает. Количество тепла, выделяемого при этом, достаточно для быстрого нагрева продукта. Такой способ широко применяется при производстве строительных материалов: строительного глиняного кирпича, цементного клинкера и пр.

По второй схеме каменноугольное топливо после предварительной подсушки и дробления подвергается более глубокой механической переработке — размолу в мельницах, после чего угольная пыль сжигается в печи при помощи пылеугольных горелок.

По третьей схеме твердое топливо подвергается химической переработке в горючий газ (газификации, полукоксованию, коксованию). К такой переработке приходится прибегать при необходимости применять низкосортное или влажное топливо, так как при непосредственном сжигании таких топлив в печах невозможно достигнуть требуемых высоких температур. Кроме того, при газовом отоплении можно освободиться от большого штата истопников-кочегаров (что особенно важно при разбросанности печей в цехах), легко автоматизировать процессы, улучшить гигиену труда, повысить общую техническую культуру предприятия. Однако нужно считаться с тем, что с самой переработкой в газ связаны потери тепла (в среднем 30%), и поэтому при большом концентрированном потреблении топлива иногда целесообразнее, отказавшись от предварительной переработки твердого топлива в газообразное, сжигать его непосредственно в печах.

По четвертой схеме твердое топливо сжигается под котлами тепловой электрической станции. Часть химической энергии топлива в результате сложного процесса превращается в электрическую энергию, которая используется в электрической печи. Выработанная электроэнергия многократно трансформируется: сначала напряжение повышается для передачи на большое расстояние — до районной понизительной подстанции, затем снова понижается (до 380—500 *в* и более) и с этим напряжением электроэнергия подводится к электрическим печам. Принципиальные схемы электрических печей рассмотрены ниже. В зависимости от типа печи возможна дополнительная трансформация электрической энергии с сохранением или с повышением частоты тока с 50 до 10 000 *гц* и более (при индукционном нагреве). При каждой трансформации теряется часть энергии: в мощных печах 2—4%, в менее мощных печах 4—5%, в преобразователях до 10—15%. Общие электрические потери могут быть весьма большими. Коэффициент полезного действия сети от электрического генератора до электротермической установки составляет величину порядка 0,80—0,85. Устройство самой электрической паротурбинной станции довольно сложно. Для повышения тепловой экономичности паровые котлы строятся на высокие параметры пара (140 *бар* и 565 °С), а также на сверхкритические параметры пара (300 *бар* и 580 °С). В настоящее время строятся главным образом крупные конденсационные электростанции мощностью 1 200—2 400 тыс. *квт* и выше, имеющие хорошие технико-экономические показатели. Строительство таких станций позволяет снизить расход условного топлива на отпущенный киловатт-час до 310—360 *г/квт·ч* и повысить к. п. д. до $\eta_{э.с}=0{,}45$. При работе котлов и турбин на сверхвысоких начальных параметрах к. п. д. возрастает до 40% и более. На ТЭЦ, расположенных в городах и при крупных заводах, благодаря применению теплофикационного цикла общее полезное использование топлива повышается до 45—60%.

В электрических печах электрическая энергия превращается в тепло, передаваемое нагреваемому материалу. Этот процесс также связан

с потерями энергии. Общий к. п. д. электрической печи выражается произведением:

$$\eta_{э.п}=\eta_т\eta_{эл},$$

где $\eta_т$ — тепловой к. п. д. печи; $\eta_{эл}$ — электрический к. п. д. печи.

Сложность описанных схем возрастает от первой к последней. Самой простой является первая схема. Затраты на постройку печей для непосредственного сжигания твердого топлива в слое минимальны. Затраты на содержание персонала невелики при использовании природного газа и мазута, так как в этом случае топочные процессы нетрудоемки и могут быть легко автоматизированы. При слоевом сжигании твердого топлива трудоемкость топочных процессов велика, их трудно автоматизировать, и поэтому расход на рабочую силу может быть весьма значительным. Остальные схемы требуют более значительных капиталовложений и большего расхода материалов и труда на строительство пылеприготовительных, газогенераторных установок и электрических станций, а поэтому труднее осуществимы.

Экономически наивыгоднейшим вариантом использования твердого топлива является тот, при котором обеспечивается наиболее рациональное с народнохозяйственной точки зрения *соотношение между капитальными затратами,* связанными с сооружением печи, *и эксплуатационными расходами.* При этом необходимо иметь в виду, что вариант, требующий наибольших затрат, может оказаться выгодным лишь в том случае, если перерасход капиталовложений достаточно быстро окупается экономией на эксплуатационных расходах (в частности, экономией топлива). Обязательным условием при выборе варианта является возможность обеспечения правильного развития технологического процесса (получение продукта требуемого качества), надежности работы и достаточной гигиены труда. Экономические сравнения целесообразно производить лишь для вариантов, в равной мере удовлетворяющих этим условиям.

Показателем экономической эффективности является *коэффициент сравнительной эффективности* [Л. 28], представляющий собой отношение

$$E=\frac{C_2-C_1}{K_1-K_2}=\frac{1}{T}; \qquad (1\text{-}5)$$

здесь K_1 и K_2 — капитальные вложения по сравниваемым вариантам, руб.; C_1 и C_2 — годовые расходы на тепловую обработку материала (плавку, нагрев, обжиг и т. п.), руб/год; T — срок окупаемости дополнительных капитальных вложений, лет.

Если имеется несколько вариантов, то наилучший вариант определяется наименьшей суммой затрат

$$K_i+T_0C_i=\min \qquad (1\text{-}6)$$

или

$$C_i+E_0K_i=\min, \qquad (1\text{-}7)$$

где K_i — капитальные затраты по данному варианту; C_i — годовые расходы на тепловую обработку, которые складываются из расходов на амортизацию оборудования, топливо, энергию, сырье, текущий ремонт, зарплату, из отчислений на соцстрах и других расходов; T_0 — отраслевой нормативный срок окупаемости (для энергетики $T_0=8$ лет); $E_0=1/T_0$ — отраслевой нормативный коэффициент эффективности (для энергетики $E_0=0{,}125$).

Пример 1-1. Рассматриваются два варианта тепловой обработки материала. По первому сумма капитальных вложений $K_1=3\,000$ тыс. руб. при годовых расходах на эксплуатацию $C_1=3\,300$ тыс. руб/год. По второму $K_2=2\,500$ тыс. руб. при годовых расходах на эксплуатацию $C_2=3\,500$ тыс. руб/год.

Срок окупаемости по формуле (1-5):

$$T=\frac{K_1-K_2}{C_2-C_1}=\frac{3\,000-2\,500}{3\,500-3\,300}=2\,^1/_2 \text{ года},$$

а коэффициент сравнительной эффективности

$$E=1/2{,}5=0{,}4.$$

При нормативном коэффициенте эффективности $E_0=0{,}2$ ($T_0=5$ лет) второй вариант является более целесообразным.

Следует отметить, что при сопоставлении экономичности эффект от изменения способа тепловой обработки следует брать не только для данного участка производства, но и для сопряженных с ним участков. Например, если рассматриваются два варианта нагрева стальных заготовок перед штамповкой, первый — в обычных пламенных печах, а второй — электрический высокочастотный, то нельзя забывать, что при быстром индукционном нагреве практически не получается окалины, а у молотов это увеличивает срок службы дорогостоящих штампов. Стало быть, во втором варианте следует учесть также сокращение расходов на изготовление штампов.

1-6. РОЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА[1]

Бóльшая часть материалов и продуктов проходит тепловую обработку в пламенных печах. Так, подавляющее количество стали получается в мартеновских печах и в конверторах с кислородным и парокислородным дутьем. Сталь, выплавляемая в указанных агрегатах, широко используется в народном хозяйстве, в том числе в машиностроении. Но некоторое количество вырабатываемой стали, а именно высококачественная высоколегированная сталь, получается в электрических печах, главным образом в дуговых. Эта область металлургии называется электрометаллургией. Она непрерывно развивается, так как народному хозяйству требуются высококачественные стали. История металлургии — это борьба за качество и чистоту металлов и их сплавов. Современное электронное машиностроение развивается с использованием особо чистых металлов и сплавов. Даже незначительное количество растворенных в металле газообразных примесей может при нагреве деталей испортить вакуум в электровакуумных приборах. Современной технике необходимы металлы и сплавы, выдерживающие большие нагрузки при высоких температурах (лопатки газовых турбин, детали ракетных двигателей и т. д.). Для этой цели применяются ниобий, молибден, тантал, вольфрам и их сплавы. Но даже ничтожно малые примеси газов (азота, кислорода, водорода), а также твердые примеси (углерода и др.) резко снижают механические свойства этих металлов, увеличивают их хрупкость и ухудшают качество сварки. Получение перечисленных металлов производится в электрических печах, позволяющих развить высокие температуры (3 500—5 000 °С и выше).

Высококачественные чистые металлы и сплавы получают в установках электрического нагрева с вакуумом или с защитной атмосферой. При электрическом нагреве возможно вести процессы в широком диапазоне давлений, вплоть до 10^{-5}—10^{-7} *мм рт. ст.*, а также широко использовать защитные атмосферы.

Наиболее часто для получения металлов и сплавов повышенного качества используется плавка в вакууме. За счет быстрого развития вакуумной техники стало возможным в условиях глубокого разрежения получить слитки весом до 30 *т*.

---

[1] § 1-6 написан инж. С. А. Щукиным.

Выплавка, горячая деформация и термообработка в вакууме или в защитной атмосфере резко улучшают физико-механические свойства многих материалов. Так, например, установлено, что трансформаторная сталь, выплавленная в вакууме, дает потери мощности 0,43—0,5 *вт/кг*, в то время как для такой же стали, выплавленной в атмосфере, они равны 0,7— 0,85 *вт/кг*. Применение в подшипниках стали, полученной при вакуумном плавлении, увеличивает срок их службы в 4—5 раз.

Электрический нагрев позволяет регулировать температуру в рабочей камере с точностью до ±1—6 °С. Точность соблюдения температурных режимов имеет решающее значение в процессе получения полупроводников, позволяет повысить их надежность и долговечность, значительно снизить потери от брака. Высокая точность поддержания температурных режимов необходима для получения качественных монокристаллов, особо ответственных изделий из оптического стекла и в ряде других случаев.

Способы электрического нагрева. Техника достижения высоких температур в электротермических установках

Наиболее важное значение в промышленности в настоящее время имеют следующие виды электрического нагрева: косвенный в печах сопротивления, прямой или контактный, дуговой, индукционный, электронно-лучевой, плазменный.

Косвенный нагрев в печах сопротивления. При косвенном нагреве превращение электрической энергии в тепло осуществляется с помощью специальных нагревательных элементов, имеющих высокие внутренние сопротивления и жаростойкость. От нагретого до высокой температуры нагревательного элемента тепло передается нагреваемому изделию излучением, конвекцией и теплопроводностью. Огнеупорная кладка печи, также разогретая нагревателями до высоких температур, отдает лучеиспусканием часть тепла на нагрев изделия (рис. 1-17,*б*).

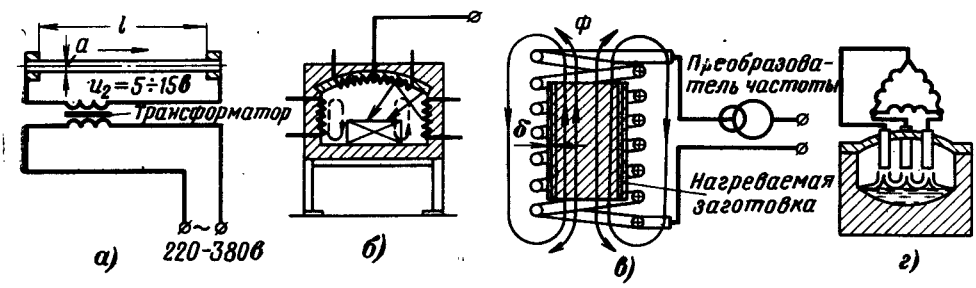


Рис. 1-17. Принципы действия электротермических устройств.
а — прямой контактный нагрев; *б* — косвенный нагрев в печи сопротивления; *в* — индукционный нагрев; *г* — дуговой нагрев.

Достигаемая температура зависит в основном от конструкции и материала нагревательного элемента. Применяя для нагревательных элементов такие высокоомные жаропрочные материалы, как нихром, карборунд, графит, вольфрам, молибден и др., можно достигать температур от 300—400 до 3 000 °С. Кроме того, при использовании нагревательных элементов из указанных материалов в рабочей камере нагревательной печи можно создавать любую газовую атмосферу: окислительную, восстановительную, нейтральную или вакуум.

Потребляемая мощность печи определяется по формуле

$$N = Q_{сек} = 0{,}001 I^2 R, \ квт; \qquad (1\text{-}8)$$

здесь $Q_{еек}$ — количество тепла, выделяемое в печи, *вт*; I — сила тока, *а*; R — суммарное сопротивление нагревательных элементов, *ом*.

Прямой (контактный нагрев). В отличие от косвенного нагрева при прямом нагреве тепло выделяется непосредственно в нагреваемом изделии при прохождении по нему тока (рис. 1-17,*а*). Выделение тепла в объеме нагреваемой детали позволяет значительно снизить тепловые потери (в основном теплоизлучение с поверхности в окружающую среду), поэтому этот вид нагрева имеет высокий к. п. д.

С помощью контактного нагрева производится разогрев деталей, длина которых значительно превышает поперечные размеры, например нагрев прутков перед завивкой пружин.

Индукционный высокочастотный нагрев. Основной особенностью индукционного нагрева является превращение электрической энергии в тепло с помощью переменного магнитного потока, т. е. индуктивным путем. Если по цилиндрической спиральной катушке (индуктору) пропускать переменный электрический ток I, то вокруг катушки образуется переменное магнитное поле $\Phi_м$, как это показано на рис. 1-17, *в*. Наибольшую плотность магнитный поток имеет внутри катушки. При размещении в полости индуктора металлического проводника в материале возникает электродвижущая сила, мгновенное значение которой равно:

$$e_м = -\frac{d\Phi_м}{d\tau}. \qquad (1\text{-}8а)$$

Под влиянием э. д. с. в металле, помещенном в быстропеременное магнитное поле, возникает электрический ток, величина которого зависит в первую очередь от величины магнитного потока, пересекающего контур нагреваемого материала, и частоты тока f, образующего магнитный поток.

Выделение тепла при индукционном нагреве происходит непосредственно в объеме нагреваемого материала, причем большая часть тепла выделяется в поверхностных слоях нагреваемой детали (поверхностный эффект). Толщина слоя, в котором происходит наиболее активное выделение тепла, равна:

$$\delta = 5\,030\sqrt{\rho/\mu f}, \ см, \qquad (1\text{-}9)$$

где ρ — удельное сопротивление, *ом · см*; μ — относительная магнитная проницаемость материала; f — частота, *гц*.

Из приведенной формулы видно, что толщина активного слоя (глубина проникновения) уменьшается для данного металла с увеличением частоты. Выбор частоты зависит главным образом от технологических требований. Например, при плавке металлов потребуется частота 50—2 500 *гц*, при нагреве — до 10 000 *гц*, при поверхностной закалке — 30 000 *гц* и более.

При плавке чугуна применяется промышленная частота (50 *гц*), что позволяет увеличить общий к. п. д. установки, так как исключаются потери энергии на преобразование частоты.

Индукционный нагрев является скоростным, так как тепло выделяется непосредственно в толще нагреваемого металла, что позволяет производить плавку металла в индукционных электропечах в 2—3 раза быстрее, чем в отражательных пламенных.

Нагрев с помощью токов высокой частоты можно производить в любой атмосфере; индукционные термические установки не требуют времени для разогрева и легко встраиваются в автоматические и поточные

линии. С помощью индукционного нагрева можно достигать температур до 3 000 °С и более.

Благодаря своим преимуществам высокочастотный нагрев широко применяется в металлургической, машиностроительной и металлообрабатывающей промышленности, где используется для плавления металла, при термической обработке деталей, нагреве под штамповку и т. д.

Дуговой нагрев. Превращение электрической энергии в тепловую при дуговом нагреве осуществляется в факеле электрической дуги (рис. 1-17, *г*). Электрическая дуга представляет собой один из видов самостоятельного газового разряда, возникающего между положительным (анодным) и отрицательным (катодным) электродами. Для получения дугового разряда электроды, находящиеся под разностью потенциалов, сначала приводятся в соприкосновение. За счет большой величины тока электроды в местах соприкосновения разогреваются до такой температуры, при которой возникает термоэмиссия электронов.

Разогретая в разрядном промежутке до высокой температуры газовая фаза отдает свою энергию нагреваемому металлу главным образом лучеиспусканием. Столб дугового разряда представляет собой газовую плазму, т. е. газ в ионизированном состоянии, в котором величины пространственных зарядов, созданных положительно и отрицательно заряженными частицами, одинаковы, с преобладающим хаотическим тепловым движением ионизированных молекул. Плазма состоит из нейтральных газовых частиц с повышенной энергией, положительных ионов и электронов. Заряды положительных ионов и электронов компенсируют друг друга, так что в электрическом отношении плазма столба нейтральна.

Температура дуги пропорциональна потенциалу ионизации газа, в котором горит дуга, и с достаточной точностью может быть вычислена по формуле

$$T_д \approx 800\, U_i,\ °К, \qquad (1\text{-}10)$$

где U_i — потенциал ионизации газа, *в*.

Так как потенциал ионизации различных элементов меняется от 3,87 до 24,5 *в*, то из этой формулы следует, что температура дуги при атмосферном давлении должна находиться в пределах от 3 200 до 20 000 °К.

Благодаря высокой температуре, развивающейся в зоне горения дуги, этот вид нагрева широко используется в металлургии для выплавки качественных сталей, ферросплавов, тугоплавких и жаропрочных металлов и т. д., а также в других отраслях промышленности, где требуется высокотемпературный нагрев.

Электроннолучевой нагрев. В последние годы резко возросла потребность в металлах и сплавах, ранее почти не применявшихся или применявшихся в незначительных количествах. К таким металлам относятся уран, цирконий, ниобий, тантал, вольфрам и др., которые используются в условиях исключительно высоких статических и динамических нагрузок при очень высоких температурах. В свою очередь свойства указанных металлов находятся в прямой зависимости от содержания в них примесей, особенно кислорода, водорода и азота. Обеспечить получение ультрачистых металлов можно, лишь производя операции выплавки и горячей деформации в условиях глубокого вакуума. Наиболее эффективно указанные операции можно производить с помощью электроннолучевого нагрева, принцип которого состоит в следующем.

Если свободный электрон, имеющий отрицательный электрический заряд, поместить в пространство между двумя электродами с разностью потенциалов $U_р$, то под влиянием электрического поля электрон начнет

двигаться к положительному (анодному) электроду. Скорость перемещения электрона зависит от величины $U_р$ и может быть вычислена по формуле

$$c \approx 600 \sqrt{U_р}, \ км/сек, \tag{1-11}$$

где c — скорость электрона в электрическом поле, *км/сек*; $U_р$ — разность потенциалов на участке, пройденном электроном, *в*.

В случае движения электрона в вакууме, где он не тратит энергии на столкновение с молекулами воздуха, кинетическую энергию, которую приобретает электрон под действием электрического поля, можно выразить зависимостью

$$\frac{mc^2}{2} = \varepsilon U_р, \tag{1-12}$$

где m — масса электрона, равная $9{,}1 \cdot 10^{-28}$, *г*; ε — заряд электрона, равный $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ *к*; c — скорость электрона, *см/сек*; $U_р$ — разность потенциалов, *в*.

Из формул (1-11) и (1-12) видно, что кинетическая энергия электрона находится в прямой зависимости от величины разности потенциалов между электродами или так называемого разгоняющего напряжения.

При столкновении быстролетящего электрона с поверхностью анодного электрона может произойти либо его поглощение материалом анода, либо его отражение от поверхности. При поглощении электрона материалом анода около 70—80% его кинетической энергии преобразуется в тепло. Если катодный электрод (термокатод) нагреть до температуры, при которой начнется интенсивная термоэлектронная эмиссия, то между катодным и анодным электродами установится поток электронов, так называемый анодный ток, величина которого численно равна току эмиссии катода. За счет бомбардировки анода потоком быстрых электронов температура быстро повышается. Скорость нагрева и предельная температура зависят от величины разгоняющего напряжения и анодного тока, т. е. от мощности электронного потока

$$N_п = I_а U_р, \ вт, \tag{1-13}$$

где $N_п$ — мощность электронного потока, *вт*; $I_а$ — анодный ток, *а*; $U_р$ — разгоняющее напряжение, *в*.

Установки, в которых нагреваемый металл служит анодом, широко используются в технике, особенно для зонной очистки. В этих установках источником свободных электронов служит термокатод, изготовленный из вольфрамовой или танталовой проволоки в виде кольца. Нагреваемый металл помещается коаксиально относительно термокатода, и между ними прикладывается разгоняющее напряжение порядка 10—15 *кв*. Термокатод нагревается до 2 000—2 500 °С прямым пропусканием тока. За счет электронной бомбардировки металл может быть с высокой точностью нагрет до любой необходимой температуры, включая температуру кипения или испарения. Схема такой установки показана на рис. 1-18.

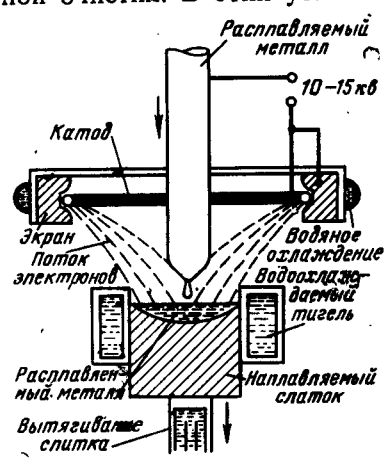


Рис. 1-18. Схема электроннолучевой установки.

Более высокую стойкость катода и меньшую возможность для возникновения разрядов между электродами, нару-

шающими нормальную работу устройства, имеют электронные термические установки с направленным потоком (лучом) электронов. Получение направленного пучка электронов производится с помощью электроннолучевых пушек, в основе работы которых лежит способность электронов изменять свою траекторию при прохождении через электрическое или магнитное поле. Используя законы электронной оптики, подбором формы и интенсивности поля можно свободнолетящие электроны собрать в электронный пучок.

Электроннолучевая пушка представляет собой систему из двух электродов, находящихся под разностью потенциалов и изолированных друг от друга. В прорези одного электрода, называемого катодным, располагается термокатод, в другом электроде — анодном имеется также прорезь, соответствующая форме электронного пучка. Конфигурация электродов выбирается такой, чтобы эмиттируемые термокатодом электроны под действием электрического поля в межэлектродном пространстве собирались в плотный пучок.

За пределами анодного электрода электроны, образующие луч, движутся по инерции до поверхности нагреваемого металла. Отсутствие разгоняющего напряжения в зоне нагрева значительно снижает количество разрядов в процессе работы установки. С помощью электроннолучевых пушек можно получать пучки самой различной конфигурации. В нагревательных электроннолучевых установках наиболее широко используются полые конические пучки, сплошные цилиндрические, конические и плоские. Управление лучом, т. е. его перемещение по нагреваемой поверхности или по зеркалу ванны жидкого металла, производится с помощью отклоняющих электромагнитных катушек.

Плавка электронным лучом в высоком вакууме не только применяется для выплавки жароупорных металлов, но и может быть использована для повышения качества специальных сталей. Сталь, полученная таким способом, работает вчетверо дольше обыкновенной, и детали, сделанные из нее, более надежны.

Плазменный нагрев. Как уже указывалось выше, преобразование электрической энергии в тепло в условиях дугового разряда происходит за счет образования газовой плазмы. При обычном дуговом разряде плазма образуется из молекул газа окружающей среды. Если же дуговой разряд происходит в потоке газа, движущегося с определенной скоростью, то образуется факел горячего ионизированного газа. Так как в плазменной струе при атмосферном давлении развивается температура 8 000—30 000 °С, то струя может быть использована для высокотемпературного нагрева.

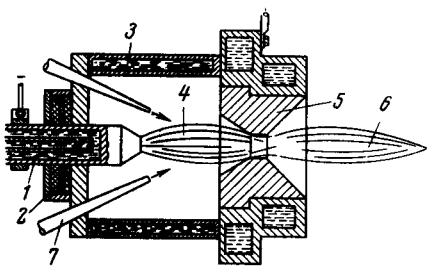


Рис. 1-19. Схема плазменного генератора.

1 — металлический водоохлаждаемый катодный электрод; *2* — узел уплотнения; *3* — водоохлаждаемые стенки камеры; *4* — электрическая дуга; *5* — анодный электрод с соплом; *6* — плазменная струя; *7* — подача газа.

Формирование плазменной струи производится с помощью специальных *плазменных генераторов, или плазмотронов.*

Плазменный генератор представляет собой камеру, в которой размещены два электрода, причем анодный электрод выполнен в виде специальной пластины с соплом, а катодный — в виде стержня, как это показано на рис. 1-19. Если зажечь дугу между электродами и начать подавать в камеру газ, то из сопла анодного электрода будет вырываться струя плазмы с очень высокой температурой. Газ, подаваемый в камеру, служит также и для охлаждения электродов. При выходе из сопла струя плазмы отдает свою энергию нагреваемому телу теплоизлучением и теплопроводностью, а также за счет кинетической энергии направленного движения плазмы. Кроме плазмотронов, использующих факел электрической дуги для образования струи плазмы, имеются конструкции плазменных генераторов, в которых плазма образуется с помощью высокочастотных индукционных разрядов.

Высокочастотный индукционный разряд позволяет получать чистую плазму, не загрязненную материалами электродов, поэтому с ее помощью можно нагревать и плавить химически чистые материалы.

Высокая концентрация энергии в плазменной струе и возможность создания любой атмосферы — восстановительной, нейтральной или окислительной — делают перспективным применение плазменных установок в электрогазовой химии для получения ацетилена из метана, связанного азота из воздуха и т. д., в металлургии — для выращивания монокристаллов, плавки тугоплавких металлов и легированных сталей, прямого восстановления металлов из окислов.

На рис. 1-20 изображена схема плазменной плавильной печи.

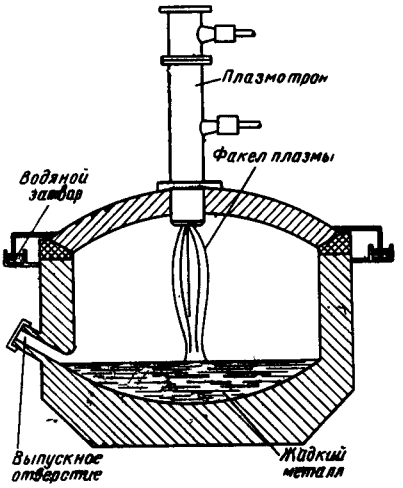


Рис. 1-20. Схема плазменной плавильной печи.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ДВИЖЕНИЕ ГАЗОВ И МАТЕРИАЛОВ В ПЕЧАХ

2-1. ВИДЫ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОВ

Классификация видов движения газов. Движение газов может быть *принудительным*, вызванным действием вентиляторов, струйных аппаратов, и *естественным* — за счет разности плотностей движущихся газов. По характеру различают *ламинарное* и *турбулентное* движение. В рабочем пространстве печей газы чаще всего движутся струями в среде менее подвижных и застойных газов (*струйное* движение). В каналах печей газы движутся сплошными потоками (*канальное* движение). Газы в топках и печах часто пронизывают слой кускового или сыпучего материала и оказывают давление на кусочки материала (*фильтрационное* движение); такое движение газов может иметь место в плотном слое материала, в кипящем слое, во взвешенном слое. Иногда газы, несущие взвесь материала, искусственно закручивают в круглых каналах — тогда имеет место *циклонное* движение.

Естественное и вынужденное движение газов. Ламинарный и турбулентный характер движения. В печах газы иногда движутся с малыми скоростями, и тогда при наличии значительных свободных объемов и больших разностей температур в различных точках этих объемов движение газов может быть естественным, однако в настоящее время большинство печей работает с принудительным движением газов. При принудительном движении газов картина их движения в рабочем пространстве печи или распределение давлений в нем при сложных конструкциях печей не могут быть определены теоретически, и поэтому прибегают к опытному изучению характера движения на моделях печей, обычно очень легко изготовляемых. Метод моделирования, развитый в нашей стране М. В. Кирпичевым и его сотрудниками, является весьма ценным вкладом в печную теплотехнику, так как позволяет проверить целесообразность конструкции до ее постройки.

Движение газов в печных каналах и полостях, вообще говоря, может идти несмешивающимися струями по траекториям, подобным форме канала; такое движение называется ламинарным. Это соответствует значению критерия Рейнольдса $Re \leqslant 2\,300$*. Оно редко наблюдается в печных газоходах. При ламинарном движении перенос массы осуществляется путем *молекулярной диффузии*, а передача тепла — путем теплопроводности; тепло- и массообмен протекает слабо. При $Re > 2300$ инерционные силы в потоке превалируют над силами трения настолько, что в потоке образуется множество возбужденных пересекающихся струек: масса переносится главным образом путем *вихревой диффузии*, а теплота — посредством конвекции. Скорость в каждой точке изменяется по величине и направлению. Такое движение называется турбулентным. При постоянном расходе газа через какое-либо сечение средняя скорость турбулентного движения в данной точке остается постоянной по величине и направлена в сторону движения. На рис. 2-1 показано значение вектора мгновенной скорости w в данной точке, являющейся геометрической суммой средней скорости $\overline{w}$ (постоянной по величине и направлению) и пульсационной скорости $\overline{w}'$, изменяющейся по величине и направлению:

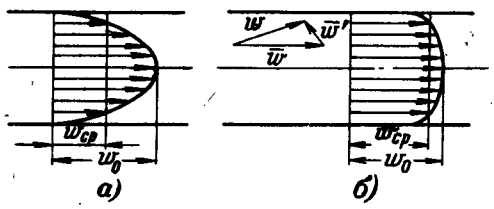


Рис. 2-1. Профиль скоростей при ламинарном (*а*) и турбулентном (*б*) движении газового потока.

$$w = \overline{w} + \overline{w}'. \qquad (2\text{-}1)$$

Благодаря пульсационной скорости и происходит энергичный тепло- и массообмен в потоке. Если эпюра скоростей по сечению канала при ламинарном движении изображается параболой (рис. 2-1,*а*), для которой отношение средней скорости по всему сечению к максимальной скорости по оси w_0 будет $w_{ср}/w_0 \approx 0{,}5$, то при турбулентном движении из-за выравнивающего действия пульсационных скоростей отношение $w_{ср}/w_0 = 0{,}75 \div 0{,}84$ (рис. 2-1,*б*). Состояние турбулентного потока характеризуется степенью турбулизации $\varepsilon_{турб}$ и масштабом турбулентности $l_{турб}$. Степень турбулизации может быть различной, что существенно влияет на характер движения. Степень турбулизации выражается отношением среднеквадратичной пульсационной скорости в потоке к средней скорости потока:

$$\varepsilon_{турб} = \frac{\sqrt{(\overline{w}')^2}}{w_{ср}}, \qquad (2\text{-}2)$$

где $\overline{w}'$ — пульсационная скорость; $w_{ср}$ — средняя скорость потока.

Масштабом турбулентности $l_{турб}$ называется расстояние, на котором проявляется связь между пульсациями, или, иначе, расстояние, на котором пульсирующие объемы газа теряют свои скоростные особенности.

2-2. ДВИЖЕНИЕ ГАЗОВ В СЛОЕ ЗЕРНИСТОГО И КУСКОВОГО МАТЕРИАЛА ИЛИ ТОПЛИВА

Сущность аэродинамического состояния слоя легко понять из следующего. Через слой, состоящий из отдельных твердых частиц, пропускается восходящий поток газа, причем на частицы материала или топли-

* При соблюдении условий особо спокойного входа в канал ламинарное движение может наблюдаться и при $Re > 2\,300$.

ва в таком потоке действует сила аэродинамического давления, определяемая по формуле

$$P = C\frac{\pi d^2}{4}\frac{w_{от}^2}{2}\rho,\ н, \qquad (2\text{-}3)$$

где d — приведенный диаметр частицы, *м*; $w_{от}$ — относительная скорость газа, *м/сек*; ρ — плотность газа, *кг/м³*; C — коэффициент, зависящий от критерия Re.

В зависимости от величины аэродинамического давления потока, зависящего в свою очередь от величины скорости $w_{от}$, слой кускового материала может находиться в двух качественно различных состояниях. При скорости потока ниже некоторой критической величины $w'_{кр}$, когда сила тяжести кусочка больше аэродинамического давления снизу, т. е. когда $G>P$, частицы неподвижны. Этому состоянию соответствует *плотный слой* (рис. 2-2,*а*).

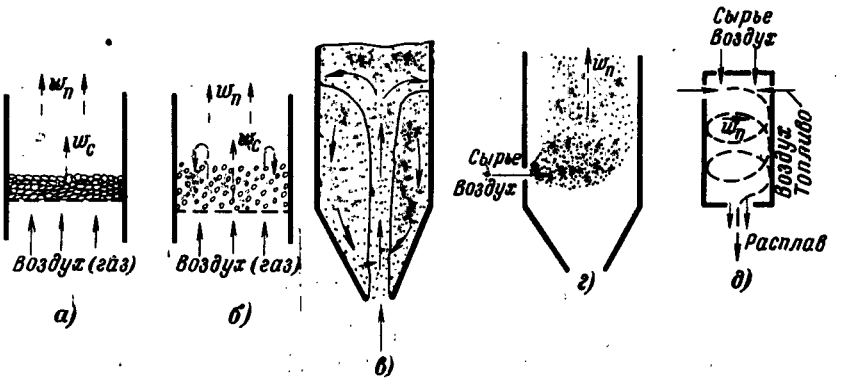


Рис. 2-2. Аэродинамическое взаимодействие газов и слоя кускового (сыпучего) материала.

а — плотный (фильтрующий) слой; *б* — кипящий слой; *в* — фонтанирующий слой; *г* — взвешенный слой; *д* — циклонное движение; $w_с$ — скорость газов в слое; $w_п$ — скорость потока газов вне слоя.

При увеличении скорости до первого критического значения $w'_{кр}$, при котором аэродинамическое давление на частицы становится равным их весу ($P=G$), слой переходит в новое качественное состояние—*кипящий* или *псевдоожиженный* слой. В кипящем слое твердые частицы теряют взаимный постоянный контакт, получают возможность перемещаться и перемешиваться, объем слоя возрастает. Вследствие неправильности геометрической формы отдельных кусочков и неравномерности поля скоростей аэродинамическое давление, действующее на них, неравномерно. Это создает при прямоточном продувании слоя потоком газов или воздуха сложное вращательно-пульсирующее движение частиц, которое и вызывает впечатление кипящей жидкости (рис. 2-2,*б*).

Перепад давления в слое может быть определен из условия равенства сил гидродинамического давления и силы тяжести твердых частиц

$$\Delta p_{сл} = g\rho_т(1-\varepsilon)H, \qquad (2\text{-}4)$$

где $\rho_т$ — плотность твердых частиц; ε — средняя порозность слоя в рабочем состоянии; H — высота кипящего слоя.

С достаточной для технических расчетов точностью можно принять

$$g\rho_т(1-\varepsilon)H = g\rho_н H_0, \qquad (2\text{-}5)$$

где $\rho_н$ — насыпная плотность взвешенного материала; H_0 — высота слоя в неподвижном состоянии.

Тогда $\Delta p_{сл} = g\rho_н H_0$. (2-6)

Если скорость потока газа в кипящем слое постепенно увеличивать, то сопротивление слоя сначала несколько снижается, а затем становится постоянным. При этом режиме увеличение скорости газа приводит к росту скорости движения частиц. За счет этого возрастает толщина слоя и соответственно величина проходного сечения для газа. Последним и объясняется постоянство сопротивления слоя.

Разновидностью кипящего слоя является *фонтанирующий слой* (рис. 2-2,*в*). Он получается в конических и коническо-цилиндрических аппаратах с достаточно большим углом в вершине конуса. Здесь газ сосредоточенной струей подается лишь в центральную часть корпуса. Скорость струи высокая, и она увлекает с собой снизу вверх твердые частицы, которые фонтаном поднимаются в расширенную часть аппарата. В результате расширения струи ее скорость снижается, частицы отбрасываются к периферии. В периферийной зоне скорость потока газа мала. Поэтому здесь твердые частицы опускаются вниз и в нижней узкой части аппарата вновь попадают в центральный фонтан.

При достижении второго критического значения скорости $w''_{кр}$ сила аэродинамического давления становится больше силы веса ($P > G$) и частицы начинают выноситься потоком газа — кипящий слой переходит во *взвешенный* слой (рис. 2-2,*г*).

Значение критических скоростей псевдожижения определяется по экспериментальным формулам:

$$w'_{кр} = \frac{\nu}{d} \frac{Ar}{1400 + 5{,}22\sqrt{Ar}}; \qquad (2\text{-}7)$$

$$w''_{кр} = \frac{\nu}{d} \frac{Ar}{18 + 0{,}61\sqrt{Ar}}; \qquad (2\text{-}8)$$

здесь Ar — критерий Архимеда, определяемый по формуле

$$Ar = \frac{gd^2(\rho_т - \rho)}{\nu^2\rho}.$$

Циклонное движение. В циклонах, имеющих цилиндрическую форму, газам, несущим взвесь измельченного материала или топлива, придается вращательное движение с целью использования центробежного эффекта для сепарации частиц, а также для интенсификации тепло- и массообмена между горячими газами и взвесью (рис. 2-2, *д*). Вращение потока достигается тангенциальным вводом газов с большой начальной скоростью. Циклоны применяются в качестве аппаратов для обеспыливания; кроме того, в настоящее время циклонные топки и предтопки применяются для сжигания измельченного твердого топлива под крупными котельными агрегатами. Высокая интенсивность тепло- и массообмена делает применение циклонного принципа перспективным не только в энергетике, но и в технологических агрегатах, особенно предназначенных для плавки металлов и обжига материалов.

2-3. АЭРОДИНАМИКА СТРУЙ

Движение газов в печах, работающих на жидком или газообразном топливе, является главным образом движением струй, вдуваемых в печное пространство форсунками и горелками. Рассмотрим сначала аэродинамику струи, развивающейся в неограниченном пространстве, заполненном неподвижной газовой средой, имеющей те же физические свойства и ту же температуру, что и вытекающий газ. Такая струя называется *свободной затопленной струей* в отличие от *свободной незатопленной струи* и *несвободной* (*зажатой*) струи, а также от струи, состоящей из нескольких потоков.

Свободная струя может быть ламинарной и турбулентной. Теория свободной струи разработана Г. Н. Абрамовичем, Г. П. Иванцовым, Д. Н. Ляховским и др. На рис. 2-3 показана схема турбулентной свободной струи, вытекающей из круглого насадка. Масса движущегося газа струи взаимодействует с окружающим неподвижным газом и захватывает его во все возрастающем количестве. Струя состоит из двух участков: а) начального, на котором осевая скорость w_0 постояина

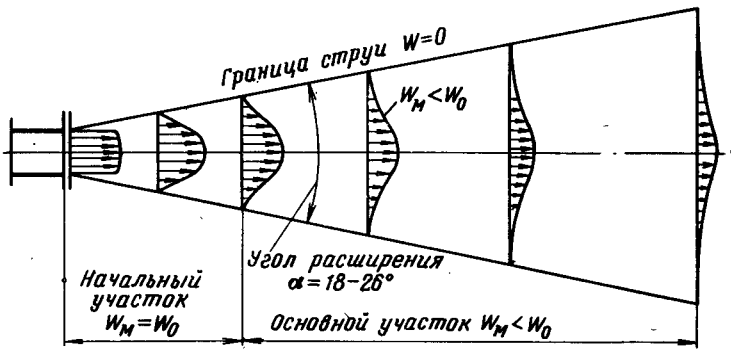


Рис. 2-3. Схема свободиой турбулеитной струи.

(длина этого участка составляет $l_{нач} = (4 \div 6)\, d$, где d — диаметр выходного отверстия), и б) основного участка, на котором осевая скорость w_0 снижается во всех частях струи. Осевая скорость w_0 в любом сечении основного участка находится из соотношения

$$\frac{w_0}{w_0^{макс}} = \frac{0{,}96}{\frac{al}{d} + 0{,}29}, \tag{2-9}$$

где a — коэффициент структуры струи (для круглого сечения струи $a = 0{,}14 \div 0{,}16$); l — расстояние от рассматриваемого сечения до сопла.

Количество газа в рассматриваемом сечении $V_{сеч}$ можно определить из формулы

$$\frac{V_{сеч}}{V_г} = 2{,}22 \left(\frac{al}{d} + 0{,}29\right), \tag{2-10}$$

где $V_г$ — начальный расход газа, $м^3/сек$.

Из рассмотрения формул (2-9) и (2-10) видно, что на основном участке профиля изменения скоростей и усредненных расходов газа подобны для всех его сечений. Этим объясняется и то, что если истекающий газ и окружающая среда имеют разную температуру t_1 и t_2, то температурные поля также будут подобны:

$$\frac{t_{см} - t_2}{t_1 - t_2} = \frac{0{,}7}{\frac{al}{d} + 0{,}29} = \beta, \tag{2-11}$$

откуда

$$t_{см} = \beta t_1 + t_2 (1 - \beta), \tag{2-12}$$

где $t_{см}$ — искомая температура; t_1 — температура истекающего газа; t_2 — температура окружающей среды.

Если плотность газов струи значительно отличается от плотности среды, то происходит искривление струи. Струя, более плотная, чем окружающая среда, отклоняется вниз, а менее плотная — вверх.

Из приведенных формул видно, что скорость струи в любом сечении, а также кратность циркуляции струи $V_{сеч}/V_г$ зависят от расстоя-

ния сечения от сопла, выраженного числом диаметров сопла, т. е. от l/d. Скорость при увеличении l/d уменьшается, а кратность циркуляции увеличивается. Следовательно, для создания большей кратности циркуляции следует брать сопла малого диаметра d, т. е. распределять газ на ряд струй. Выведенные соотношения, как показали В. Н. Тимофеев и П. И. Сычев, являются частным случаем более общей закономерности горящего факела (свободной струи горящего газа). По этой закономерности поля скоростных напоров во всех сечениях подобны:

$$\frac{h^{\text{ск}}}{h_0^{\text{ск}}} = \frac{0{,}933}{\left[\frac{al}{d} + 0{,}29\right]^2}. \qquad (2\text{-}13)$$

Если поперечное сечение струи, выходящей из форсунки или горелки, невелико по сравнению с объемом рабочей камеры печи, то такая струя имеет свойства свободной струи. Однако ограждение печи мешает беспрепятственному притоку газов к струе и на поверхности струи возникает разрежение, наибольшее значение которого наблюдается у места выхода струи. Таким образом, создается циркуляция газов в рабочем пространстве печи (*внутренняя циркуляция*). С увеличением начальной скорости и отношения l/d циркуляция возрастает, а с увеличением объема камеры она уменьшается. На рис. 2-4 показана циркуляция газов в камерной печи с верхним расположением газовой инжекционной горелки.

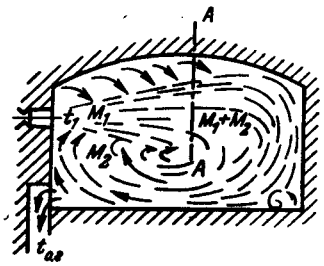


Рис. 2-4. Циркуляция газов в камерной печи, отапливаемой одиой инжекционной горелкой.

Среднюю температуру газов в сечении A-A можно найти из уравнения теплового баланса смешения (без учета охлаждения газов вследствие лучеиспускания):

$$M_1c_1t_1 + M_2c_2t_2 = (M_1+M_2)\,c_{\text{см}}t_{\text{см}}; \qquad (2\text{-}14)$$

предположив, что $c_1 = c_2 = c_{\text{см}}$ и $t_2 = t_{\text{о.г}}$ (температуре отходящих газов), найдем кратность циркуляции i из уравнения

$$t_{\text{см}} - t_{\text{о.г}} = \frac{t_1 - t_{\text{о.г}}}{1+i}, \qquad (2\text{-}15)$$

откуда следует, что чем выше кратность циркуляции, тем равномернее будет температура в печи.

2-4. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ НАПОР ГАЗОВ

Напомним, что естественный геометрический напор имеет место в сосуде, заполненном газом более легким, чем окружающий воздух (например, горячими дымовыми газами). Если в сосуде на высоте H от плоскости раздела воздуха и легкого газа поставить U-образный манометр (рис. 2-5), то он покажет избыточное давление, соответствующее столбику воды высотой δ *мм* и равное $\Delta p = 9{,}81\delta$, *н/м²*.

Напишем условия равновесия жидкости в U-образном манометре в горизонтальной плоскости A-A:

$$p_0 - H\rho g = p_0 - H\rho_{\text{в}}g + \Delta p, \ н/м^2, \qquad (2\text{-}16)$$

где p_0—давление атмосферы на уровне этой плоскости.

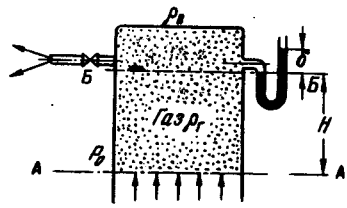


Рис. 2-5. Измерение гидростатического напора газа.

Отсюда искомое превышение давления над атмосферой на уровне *А-А* равно:

$$\Delta p = H(\rho_в - \rho)g,\ н/м^2, \qquad (2\text{-}17)$$

где ρ — плотность газа, $кг/м^3$; $\rho_в$ — плотность воздуха; g — ускорение свободного падения, $м/сек^2$.

2-5. ДВИЖЕНИЕ ГАЗОВ В КАНАЛАХ

При расчете движения газов в сложных газоходах и полостях печи пользуются уравнением Бернулли, написанным для двух произвольно взятых сечений *А-А* и *Б-Б* (рис. 2-6):

$$z_1\rho g + p_1 + \frac{w_1^2}{2}\rho = z_2\rho g + p_2 + \frac{w_2^2}{2}\rho + h_{пот},\ н/м^2, \qquad (2\text{-}18)$$

где $z_1\rho g$ и $z_2\rho g$ — геометрические напоры, выражающие энергию положения, отнесенную к 1 $м^3$ движущегося газа (для первого и второго сечений газохода); z_1 и z_2 — координаты центров входного и выходного сечений каналов, $м$; p_1 и p_2 — статические или пьезометрические напоры, выражающие энергию давления, отнесенную к 1 $м^3$ газа (для соответствующих сечений газохода), $н/м^2$; $\frac{w_1^2}{2}\rho$ и $\frac{w_2^2}{2}\rho$ — динамические или скоростные напоры, выражающие кинетическую энергию, отнесенную к 1 $м^3$ газа, $н/м^2$; w_1 и w_2 — средние действительные скорости в соответствующих сечениях; $h_{пот}$ — напор, потерянный на преодоление сопротивлений течению газов на пути между выбранными сечениями дымоходов, $н/м^2$.

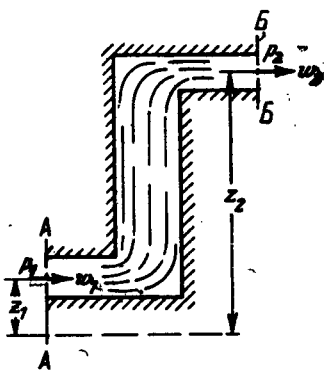


Рис. 2-6. Движение газов в канале.

Уравнение Бернулли для изотермического потока газа с неизменной плотностью может быть использовано в тех случаях, когда сечения, для которых составлено уравнение, выбраны так ,что вблизи них величины, характеризующие движение, изменяются медленно; это бывает, когда всякого рода резкие изменения сечений и резкие повороты находятся от выбранных сечений на достаточно большом расстоянии.

Величина потерь давления $h_{пот}$ складывается из потери давления на трение $h_{тр}$ и из местных потерь $h_м$, вызываемых завихрениями потока газов при изменении сечений дымоходов, при изменении их направления и т. п., т. е.

$$h_{пот} = h_{тр} + h_м. \qquad (2\text{-}19)$$

Потери давления на трение вычисляются по формуле Дарси

$$h_{тр} = \lambda \frac{L}{d}\frac{w^2}{2}\rho = \lambda \frac{L}{d}\frac{w_0^2}{2}\rho_0(1+\alpha t),\ н/м^2, \qquad (2\text{-}20)$$

где λ — коэффициент трения [зависит от числа Рейнольдса Re], который может быть принят приближенно для турбулентного движения газов: в кирпичных газоходах $\lambda = 0{,}04 \div 0{,}05$, в металлических гладких $\lambda = 0{,}025$, в металлических окисленных $\lambda = 0{,}045$. Отметим, что в дымоходах и боро-

вах газы движутся турбулентно, так как значение Re в них изменяется обычно в пределах 10 000—100 000. Более точно коэффициент трения может быть определен по формулам (10-6)—(10-8)]; w и w_0 — фактическая скорость газов, *м/сек*, и скорость, приведенная к нормальным условиям (0 °С и 760 *мм рт. ст.*); ρ и ρ_0 — плотности газов — фактическая, *кг/м*^{3}, и приведенная к нормальным условиям; t — средняя температура газов на рассчитываемом участке, °С; $\alpha = 1/273$ — коэффициент объемного расширения газов; L и d — длина и гидравлический диаметр газохода, *м*.

Для канала произвольной формы гидравлический диаметр

$$d = \frac{4f}{U}, \tag{2-21}$$

где f — сечение канала, *м*^{2}; U — его периметр, *м*.

Потери давления на местные сопротивления

$$h_м = \sum \xi \frac{w^2}{2} \rho, \ н/м^2, \tag{2-22}$$

где коэффициенты сопротивлений ξ, не зависящие от критерия Re, берутся по таблицам.

Для примера применим уравнение Бернулли для определения разрежения, создаваемого дымовой трубой (рис. 2-7). Принимая для сечения *А-А* $z_1 = 0$ и для сечения *Б-Б* $z_2 = H$, получаем (для средней температуры газов в трубе):

$$p_1 + \frac{w_1^2}{2}\rho = p_2 + \frac{w_2^2}{2}\rho + H\rho g + h_{пот}. \tag{2-23}$$

Кроме того, $p_2 = p_0 - H\rho_в g$, (2-24)

где p_0 — давление атмосферы на уровне сечения *А-А*, *н/м*^{2}; $\rho_в$ — плотность воздуха, *кг/м*^{3}.

Тогда

$$\Delta p = p_0 - p_1 = H(\rho_в - \rho)g - \frac{w_2^2}{2}\rho + \frac{w_1^2}{2}\rho - h_{пот}, \ н/м^2. \tag{2-25}$$

Величина Δp представляет собой превышение давления атмосферы на уровне *АА* над давлением газов в трубе, называемое разрежением, или тягой. Из уравнения (2-25) видно, что величина тяги зависит от высоты дымовой трубы и разности плотности воздуха и дымовых газов, в свою очередь определяемых температурами окружающего воздуха и уходящих дымовых газов. Расчет ведут обычно на худший вариант, т. е. на работу в летнее время года. Обычно скорость дымовых газов при выходе трубы, приведенную к 0 °С и 760 *мм рт. ст.*, принимают в пределах $w_0 = 2{,}5 \div 4$ *м/сек*.

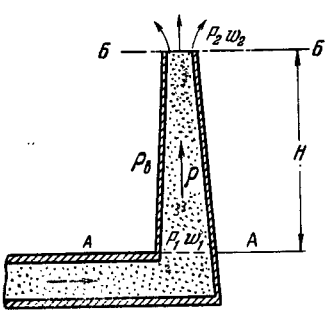


Рис. 2-7. Схема дымовой трубы.

С помощью уравнения Бернулли можно также решить задачу о количестве дымовых газов, выбивающихся из печи через отверстия в печи площадью f, *м*^{2}. Опустив решение этой практически важной задачи, приведем конечную формулу для определения количества газов, выбивающихся через отверстие:

$$V = f\mu \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \ м^3/сек, \tag{2-26}$$

где Δp — превышение давления газов над давлением атмосферы на уровне отверстия, $н/м^2$; μ — коэффициент расхода (для тонких стен $\mu=0{,}62$, для толстых — 0,82).

2-6. РАСЧЕТ ТЯГО-ДУТЬЕВОЙ УСТАНОВКИ

При расчете печная установка делится на две части: первую, в которой дымовые газы движутся под давлением (топка и рабочее пространство печи), и вторую, в которой газы движутся за счет разрежения, создаваемого тяговой установкой (дымоходы и борова после печной камеры). В практике сравнительно редко приходится прибегать к расчетам первой части газового тракта, так как сопротивления при движении газов в рабочей камере бывают малы и их нетрудно преодолеть действиями дутьевых средств. Поэтому чаще всего ограничиваются расчетом дымоходов и боровов, где газы движутся под разрежением. Для этой части установки можно написать уравнение Бернулли (левая часть — для сечения у шибера, расположенного непосредственно за печью, правая часть — для сечения борова при входе в дымовую трубу или дымосос):

$$p_0 - \Delta p_1 + h_1^{ск} = p_0 - H\rho_в g - \Delta p_2 + h_2^{ск} + H\rho g + h_{пот},\ н/м^2, \qquad (2\text{-}27)$$

где p_0 — давление атмосферы на уровне средней линии борова непосредственно за печью; Δp_1 — разрежение перед шибером у печи (обычно $\Delta p_1 = 50 \div 100\ н/м^2$ или 5—10 *мм вод. ст.*); Δp_2 — искомое разрежение в борове перед входом в дымовую трубу или в дымосос, $н/м^2$; H — подъем борова, *м*; ρ — плотность газов, $кг/м^3$; $\rho_в$ — плотность окружающего воздуха, $кг/м^3$; $h_1^{ск}$ и $h_2^{ск}$ — скоростные напоры в соответствующих сечениях, $н/м^2$; $h_{пот}$ — потери давления на расчетном участке, $н/м^2$.

Из уравнения (2-27) определяем искомое разрежение:

$$\Delta p_2 = \Delta p_1 + h_2^{ск} - h_1^{ск} - H(\rho_в - \rho)g + h_{пот},\ н/м^2. \qquad (2\text{-}28)$$

Скорости в дымоходах и в других элементах рассчитываемого участка принимают такими, чтобы разрежение Δp_2 можно было создать при помощи дымовой трубы или дымососа. Значительные разрежения (более 200 $н/м^2$) требуют создания плотных кирпичных стенок у боровов, так как иначе будут иметь место присосы воздуха, сильно ухудшающие тягу, а следовательно, и работу печей. При разрежениях более 300—400 $н/м^2$ требуется устраивать особо плотные борова и газоходы или даже сварные газоходы (футерованные изнутри кирпичом). Обычно скорости газов в боровах 2—5 *м/сек* (при 0 °С и 760 *мм вод. ст*).

При расчетах предварительно задаются допускаемыми скоростями дымовых газов в каналах и боровах, затем подбирают их сечения, пользуясь формулой

$$f = \frac{V_0}{3\,600 w_0^{доп}},\ м^2, \qquad (2\text{-}29)$$

где f — сечение газохода, $м^2$; V_0 — количество газов, проходящих через газоход час (приведенное к нормальным условиям); $w_0^{доп}$ — принятая скорость газов, приведенная к нормальным условиям.

После предварительного выбора сечений определяют разрежение, которое должно иметь место при входе в трубу или дымосос, по уравнению (2-27). Если в результате расчета величина Δp_2 окажется завышенной (или наоборот, слишком малой), то производят пересчет, внося изменения в скорости газов.

2-7. ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОВ В ПЕЧАХ

Движение газов в печах тесно связано с протекающими в них технологическими процессами и в конечном счете определяет производительность и качество тепловой обработки материала. Факел в печи — это поток горящих газов, движущихся через рабочее пространство. Являясь источником тепла, факел отдает часть своей энергии нагреваемому материалу путем конвекции, а также путем радиационно-конвективной теплопередачи. Имеют большое значение циркуляция газов, создаваемая струями газов, и направленность движения газов, например настильность пламени в плавильных печах. Движение газов в печах может регулироваться и является рычагом управления процессами, протекающими в них.

По характеру распределения давления газов промышленные печи резко отличаются от паровых котлов. Рабочее пространство печи обычно невозможно полностью изолировать от окружающей атмосферы из-за наличия периодически открывающихся (или даже постоянно открытых) рабочих окон для загрузки и выгрузки нагреваемых изделий). Это заставляет поддерживать в печной камере избыточное давление, так как при разрежении в печь засасывается из помещения холодный воздух, что нарушает нормальную работу печи или делает ее невозможной. Присос холодного воздуха значительно понижает температуру газов и вызывает увеличение потери тепла с уходящими газами и уменьшением к. п. д. печи. В дымовых газах увеличивается содержание кислорода, что приводит к окислению нагреваемого металла и к увеличению окалины или даже порче изделий.

Сравнивая гидравлические режимы промышленной печи и парогенератора, следует подчеркнуть, что если газоходы находятся под разрежением и в них имеют место присосы воздуха, то в печной установке разрежение наблюдается только за пределами рабочего пространства печи и, следовательно, движение газов в печном пространстве осуществляется за счет избыточного давления, обычно порядка 10—20 *н/м²*. В дымоходах, за пределами рабочей камеры печи, движение осуществляется за счет разрежения, создаваемого тяговыми устройствами (дымовой трубой или дымососами прямого или непрямого действия).

Газовые горелки и нефтяные форсунки выбрасывают факел в рабочее пространство со значительными скоростями и способны работать с некоторым противодавлением. Необходимый для горения воздух подается в печь вентилятором (при форсунках и горелках низкого давления) или за счет инжекции, создаваемой горелками или комбинированным путем.

В регенеративных печах избыточное давление создается за счет геометрического напора, создаваемого регенераторами, расположенными ниже пода печи, и вертикальными каналами, соединяющими регенераторы с плавильным пространством печи. Для увеличения напора воздух поддувается вентиляторами в нижнюю часть регенераторов. В печах, работающих на твердом топливе, избыточное давление получается за счет дутья первичного и вторичного воздуха и вследствие разницы уровней колосниковой решетки и пода печи. В последнем случае возникает также геометрический напор.

2-8. СТРУЙНЫЕ АППАРАТЫ

В промышленности широко применяются *струйные аппараты,* в которых за счет кинетической энергии газа или жидкости, вытекающей из сопла, всасывается другой газ или жидкость, затем оба потока смешиваются

и сжатая смесь подается для дальнейшего использования. На этом принципе работают инжекционные газовые горелки, смесители, дымососы непрямого действия и т. д. (рис. 2-8).

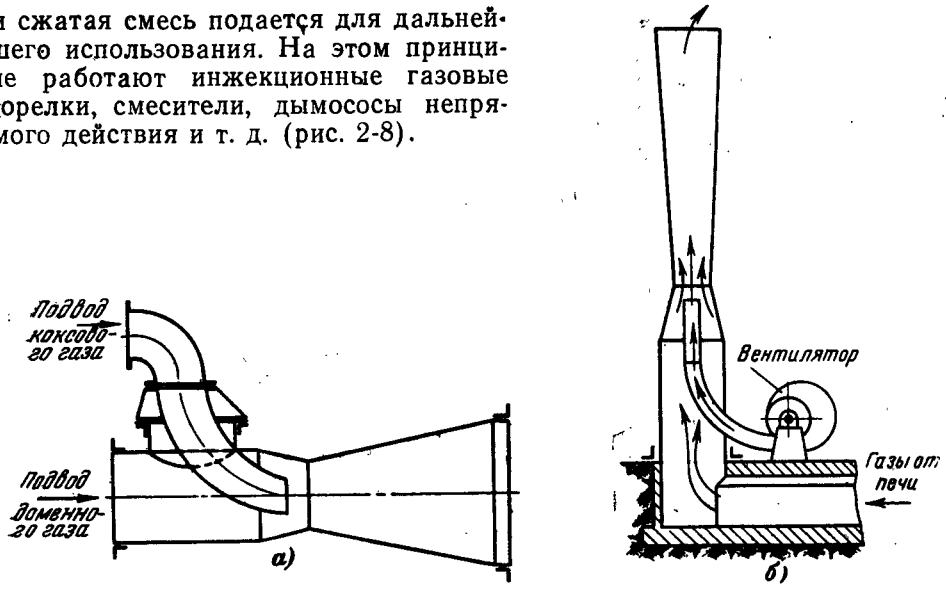


Рис. 2-8. Струйные аппараты, применяемые в печном хозяйстве.
а — смеситель; *б* — дымосос непрямого действия.

2-9. ВИДЫ ДВИЖЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

При тепловой обработке в печах материалы должны подаваться в печь, перемещаться в ней, если в этом возникает необходимость, и выдаваться из печи.

В некоторых печах материал в течение процесса обработки неподвижно лежит на подине (рис. 1-9 и 5-1, *а*). В шахтных печах материал перемещается в рабочем пространстве под действием силы тяжести (рис. 1-4 и 5-1, *г*). На место удаляемого снизу готового продукта сверху засыпается сырье. Наиболее широко в печах распространен горизонтальный транспорт материала. Здесь можно отметить конвейерные печи, печи с толкателями, вагонеточные, печи с шагающим подом и др.

Для обработки ленточных материалов используются протяжные печи. Горизонтальный транспорт кусковых материалов в барабанных печах (рис. 1-6 и 5-1, *в*) осуществляется за счет пересыпки слоя. Для этого цилиндрический корпус размещается с небольшим наклоном к горизонту (~4%) и медленно вращается. При вращении корпуса материал пересыпается по его внутренней поверхности одновременно в поперечном и продольном направлениях.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ОСОБЕННОСТИ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА В ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧАХ

3-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Органическое топливо (газообразное, жидкое и твердое) широко используется в разных тепловых установках: в топках паровых котлов, в промышленных печах, в камерах сгорания газовых турбин и воздушно-реактивных двигателей, в цилиндрах поршневых двигателей внутреннего сгорания и т. д. Сжигание топлива в таких установ-

ках преследует цель выделить тепло за счет экзотермических химических реакций и получить раскаленные продукты полного сгорания (дымовые газы) или продукты газификации. Например, в топках паровых котлов, в промышленных печах (кроме шахтных печей), в двигателях внутреннего сгорания, в камерах сгорания газовых турбин горение надо стремиться вести с наибольшей полнотой и получать продукты полного горения. Полное горение топлива — важнейшее условие экономичной работы огнетехнической установки.

В газогенераторах и в полугазовых топках разного рода осуществляются газификационные процессы, в которых в качестве окислителей используются кислород, воздух, водяной пар и углекислый газ. Реакции, протекающие в таких устройствах, едины по своей природе с реакциями горения, но в результате получаются горючие газообразные продукты газификации, имеющие самостоятельное значение или представляющие промежуточное значение, так как встречаются в теплотехнике случаи двухстадийного сжигания топлива: сначала топливо газифицируется, а затем (в том же устройстве) продукты газификации полностью дожигаются.

Условия горения в разных теплотехнических устройствах различны, как различны сами топлива и подготовка их к сжиганию. Например, в топках паровых котлов и в промышленных печах топливо сгорает чаще всего при атмосферном давлении, но, например, в доменных печах кокс сгорает при давлении, в несколько раз превышающем атмосферное. Несмотря на указанное выше различие, в процессах сгорания много общего. Общие вопросы теории горения и общие приемы сжигания топлива излагались в предыдущих курсах и здесь упоминаются только в связи с особенностями сжигания топлива в промышленных печах.

3-2. ГОМОГЕННОЕ ГОРЕНИЕ

Напомним, что процессы горения делятся на *гомогенные,* протекающие в объеме, когда топливо и окислитель находятся в одинаковом фазовом состоянии, и на *гетерогенные,* происходящие на поверхности твердого углерода. Примерами гомогенного горения являются реакции

$$2H_2 + O_2 + \frac{79}{21} N_2 = 2H_2O + \frac{79}{21} N_2; \qquad (3\text{-}1)$$

$$CH_4 + 2O_2 + 2\frac{79}{21} N_2 = CO_2 + 2H_2O + 2\frac{79}{21} N_2. \qquad (3\text{-}2)$$

Примером гетерогенного горения может служить реакция

$$C + O_2 + \frac{79}{21} N_2 = CO_2 + \frac{79}{21} N_2. \qquad (3\text{-}3)$$

В приведенных реакциях горения окислителем является сухой воздух, состоящий примерно по объему из 21% кислорода и 79% азота, и поэтому продукты сгорания балластируются азотом. При использовании в качестве окислителя чистого сухого кислорода балласт будет отсутствовать. В дальнейшем для простоты мы будем писать реакции горения без балластного азота, не забывая учитывать его при расчете горения. Азот только в условиях высоких температур (выше 2 000 °С) начинает связываться с кислородом, образуя закись азота NO, и поэтому в расчетах горения азот рассматривается как инертный газ.

Написанные реакции являются стехиометрическими, т. е. характеризуют суммарные количественные соотношения между исходными веществами и конечными продуктами реакции. В действительности горе-

ние идет с образованием промежуточных веществ в определенной последовательности. Нельзя, например, считать, что водород сразу сгорает в водяной пар. Горение протекает по цепной реакции с разветвленными цепями, когда каждая молекула порождает ряд новых активных центров, быстро ускоряющих ход реакции, т. е. носит взрывной характер. В технических устройствах скорость сгорания лимитируется не скоростью химического реагирования, а определяется смесеобразованием — физическим процессом смешения горючих газов с воздухом.

При рассмотрении процесса горения природного газа наибольший интерес представляют реакции взаимодействия кислорода с метаном, являющимся самой существенной составляющей природного газа. В присутствии кислорода метан расщепляется с выделением атома водорода с образованием радикала CH_3:

$$CH_4 \longrightarrow CH_3 + H. \qquad (3\text{-}4)$$

Атом водорода, соединяясь с молекулой кислорода, образует гидроксил OH:

$$H + O_2 \longrightarrow OH + O. \qquad (3\text{-}5)$$

Затем образуется сравнительно неустойчивая молекула метилового спирта

$$CH_3 + OH \longrightarrow CH_3OH. \qquad (3\text{-}6).$$

Метиловый спирт образует формальдегид — нестойкое соединение, которое легко распадается на окись углерода CO и водород H_2:

$$CH_3OH + O \longrightarrow HCHO + H_2O;\ HCHO \longrightarrow CO + H_2. \qquad (3\text{-}7)$$

Образование стабильных молекул CO и H_2 возможно из метилового спирта путем отщепления от него водорода и с присоединением гидроксила:

$$CH + OH \longrightarrow CO + H_2. \qquad (3\text{-}8)$$

Известно, что светимость пламени придают частицы дисперсного углерода, выделяющиеся при крекинге углеводородов. Размер сажистых частиц очень мал (0,1—0,3 *мкм*), а число их очень велико — порядка $1 \cdot 10^6$ в 1 $см^3$. Но из описанного хода реакции горения метана видно, что при подводе к корню факела и достаточно хорошем смесеобразовании в пламени отсутствуют раскаленные частицы углерода (сажи), благодаря чему пламя будет полупрозрачным с лиловато-синеватой окраской, характерной для горения водорода (фиолетовое пламя) и окиси углерода (синеватое пламя).

Смесеобразование. Образование смеси газа с окислителем осуществляется при помощи горелок (газогорелочных устройств) и реже посредством механических смесителей. В горелках с внутренним смешением газ перемешивается со всем количеством воздуха, необходимым для горения. В других газогорелочных устройствах смесеобразование не заканчивается и продолжается вне горелки. Иногда с целью замедлить горение (что бывает редко) подача газа и воздуха в камеру сгорания производится раздельными струями. Если смесеобразование в горелке не закончено или осуществляется раздельная подача топлива и окислителя, то процессы смесеобразования и горения происходят одновременно. *Хороший контакт горючего и окислителя и хорошее смесеобразование горючих газов и воздуха — важнейшие условия интенсивного и полного сгорания топлива.* Чем лучше контакт между топливом и воздухом и смесеобразование газов, тем быстрее и полнее протекает процесс горения, тем выше при одинаковых условиях температура, экономичнее и производительнее работает агрегат.

Если смесь горючего газа с воздухом предварительно тщательно приготовлена (в инжекционных или механических смесителях), то горение в целом лимитируется собственно реакцией горения (кинетикой горения) и весь процесс идет в кинетической области. Во всех других случаях, когда из сопла вытекает недостаточно перемешанная смесь или при смешении струй газа и воздуха вне горелочных устройств, имеет место горение в диффузионной области, так как оно определяется скоростью диффузии воздуха к реагирующему топливу.

Смешение струй осуществляется путем как молекулярной, так и турбулентной диффузии. Чем больше турбулентность потока смешивающегося газа, тем быстрее идет смесеобразование, тем меньше отстает подача окислителя и тем позднее сказывается ограничение химического процесса.

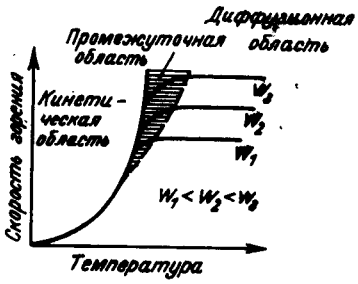


Рис. 3-1. Зависимость скорости горения от температуры при разных скоростях смесеобразования w.

На рис. 3-1 показано изменение скорости горения данного газа в зависимости от температуры процесса. Сначала горение идет по кривой кинетического горения, а затем из-за недостаточности контакта газа с окислителем оно переходит в диффузионную область. Этот переход в зависимости от скорости смесеобразования w идет по кривым w_1, w_2, w_3 и т. д. Если газ и воздух подаются раздельными струями, то кривая будет проходить особенно низко.

Между кинетической и диффузионными областями имеется промежуточная область, где процесс носит характер переходиого режима.

В атмосферных горелках, например в горелке Бунзена, осуществляется предварительное смешение с 50—60% всего потребного для горения воздуха; смесь сначала горит в кинетической области, а затем догорание идет в диффузионной области.

3-3. ЛАМИНАРНОЕ И ТУРБУЛЕНТНОЕ ГОРЕНИЕ СТРУЙ

В технических устройствах происходит горение струй газовоздушной смеси и пламя называют факелом. Факел имеет ту или иную геометрическую форму. На рис. 3-2 показан факел горелки с коаксиальными соплами (типа «труба в трубе») с раздельными струями газа, выходящего через сопло с диаметром d_1, и воздуха, выходящего через сопло с диаметром d_2. На рисунке показаны эпюры скоростей газа и воздуха u, концентраций C и температур t.

В топочной технике встречаются: 1) горение неперемешанных газов, 2) горение однородной, заранее подготовленной смеси и 3) промежуточный случай, когда предварительное смешение осуществляется на 40—60% всего потребного для горения воздуха. В каждом из этих случаев факел может быть ламинарным или турбулентным и от характера движения факела зависит интенсивность и устойчивость горения.

При ламинарном движении перемешивание идет медленно и осуществляется молекулярной диффузией, а длина факела будет большой. Наибольшая длина факела будет иметь место при подаче газа и воздуха раздельными, отделенными друг от друга струями при ламинарном характере их движения.

Повышая скорости истечения из сопл коаксиальной горелки, можно наблюдать разрушение ламинарного пламени и образование пламени турбулентного, при котором процесс горения интенсифицируется за счет вихревой диффузии и появления пульсационной скорости, вызывающей перенос клочкообразных масс газа разного размера, движущихся с раз-

ной скоростью в разных направлениях, что и усиливает смесеобразование. Ламинарный факел переходит в турбулентный через переходную область. Горящий факел, как раскаленная струя, вызывает газодинамические эффекты смешения газов на границах струй и смешения за счет инжекции, т. е. захвата воздуха быстро движущимися струями газа или наоборот. Для горелок газодинамическими критериями являются: отношение скорости воздуха к скорости газа u_2/u_1 и отношение кинетических энергий $\rho u^2/2$ воздушного потока и потока газа. Эти параметры влияют на интенсивиость горения и, следовательно, на длину факела.

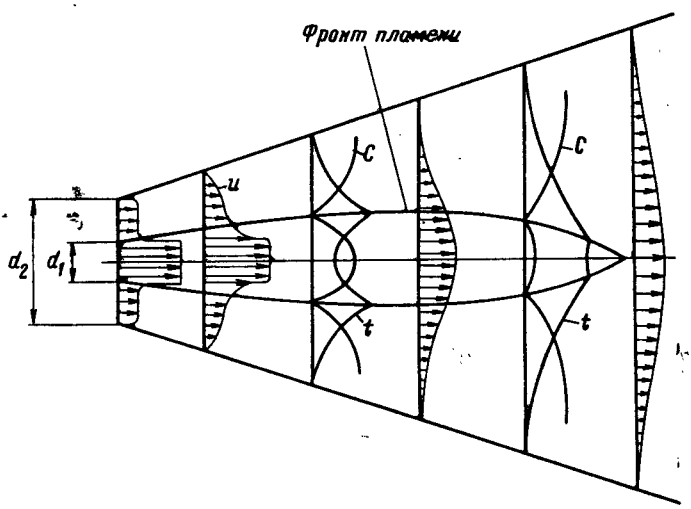


Рис. 3-2. Структура факела коаксиальной горелки (труба в трубе).

В топочных устройствах в большинстве случаев пламя распространяется в турбулентном потоке, причем турбулентность может быть увеличена при помощи завихривающих вставок в газовых горелках. Поток воздуха (или газа), проходя через такой завихритель, закручивается и принимает характер циклонного или вихреобразного движения. В циклонных камерах благодаря преимуществам закрученного потока обеспечиваются очень хорошее смесеобразование и большая интенсивность горения факела.

О скорости горения на практике судят по величине теплового напряжения объема зоны горения (топочного пространства):

$$q_v = \frac{Q}{V_т}, \ Мвт/м^3, \qquad (3\text{-}9)$$

где Q—количество выделившегося тепла, *Мвт*; $V_т$—топочный объем, $м^3$.

Теоретически тепловые напряжения могут быть очень велики, до 50 $Мвт/м^3$. В действительности эти напряжения в котельных камерных топках составляют $q_v = 0{,}2 \div 0{,}4$ $Мвт/м^3$, а в печах до 0,35—1,2 $Мвт/м^3$ и только в циклонных камерах они достигают 6,5—12 $Мвт/м^3$. Это указывает на то, что топочные объемы используются в основном для подготовительных процессов, а для собственно горения таких больших объемов не требуется.

3-4. ОСОБЕННОСТИ СЖИГАНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА В ПЕЧАХ. КЛАССИФИКАЦИЯ И УСТРОЙСТВО ГАЗОВЫХ ГОРЕЛОК

На практике сжигание газа осуществляется в топочных устройствах, состоящих из газовых горелок и камеры сгорания.

В высокотемпературных печах роль камеры сгорания выполняет рабочая камера печей, и отдельная топка в таких печах не нужна. Назначение газовой горелки — это: подготовка смеси газа и воздуха; подача газовоздушной смеси в рабочее пространство в заданном направлении; обеспечение воспламенения газовоздушной смеси при всех нагрузках; создание факела необходимой длины и излучательной способности; создание требуемой интенсивности горения; обеспечение полного сгорания газа. Выполнение перечисленных функций возможно только при правильном сочетании горелок с камерами сгорания. Смесеобразование в горелках реализуется одним из следующих главных способов:

1) *Внешнее смешение газа и воздуха,* когда в топочную камеру поступают раздельные потоки газа и воздуха и смесеобразование происходит в объеме пламени. По этому способу работают диффузионные горелки, рассчитанные на сжигание газа с очень длинным факелом (рис. 3-3,*а*).

2) *Предварительное смесеобразование,* когда в горелке производится незавершенное смешение компонентов сгорания, продолжающееся в объеме факела после выхода смеси в камеру сгорания. На этом принципе устроены смесительные горелки, имеющие большую или меньшую длину факела в зависимости от качества смешения (рис. 3-3,*б* и *в*). Сюда относятся и турбулентные горелки, имеющие приспособления для закручивания потоков, что способствует лучшему смесеобразованию.

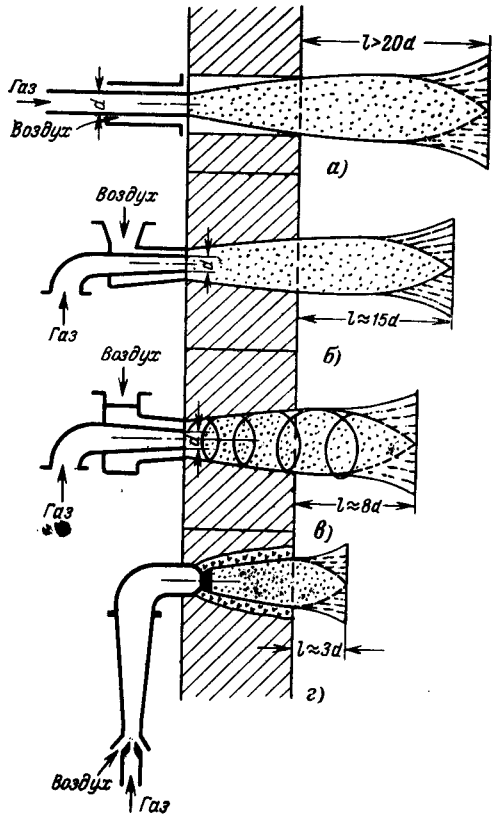


Рис. 3-3. Длина факела в зависимости от конструктивной схемы газовых горелок.

а **— диффузионная горелка;** ***б*** **— длиннофакельная горелка;** ***в*** **— короткофакельная турбулентная горелка;** ***г*** **— бесфакельная инжекционная горелка.**

3) *Частичное (предварительное) внутреннее смешение,* когда из горелки вытекает газовоздушная смесь, содержащая часть воздуха, необходимого для полного сгорания; остальной (вторичный) воздух подводится к факелу из атмосферы, окружающей пламя. По этому принципу устроены горелки (рис. 3-3,*г*).

4) *Внутреннее смешение,* когда в камеру сгорания подается хорошо подготовленная газовоздушная смесь, содержащая весь воздух, необходимый для сгорания. На этом принципе основаны инжекционные горелки (рис. 3-3,*д*). Приготовление смеси производится в инжекционных смесителях, составляющих часть инжекционной горелки, или в меха-

нических смесителях, снабжающих смесью группу горелок. Иногда горелки классифицируют по длине факела: длиннофакельные, короткофакельные и бесфакельные.

Другими признаками классификации газовых горелок являются: давление газа (горелки низкого давления — до 5 *кн/м²*, среднего давления — от 5 до 300 *кн/м²* и высокого давления — свыше 300 *кн/м²*); степень очистки газа (горелки для очищенного газа, горелки для грязного газа); подогрев компонентов сгорания и материал, идущий для изготовления горелок (металлические, керамические, кирпичные горелки).

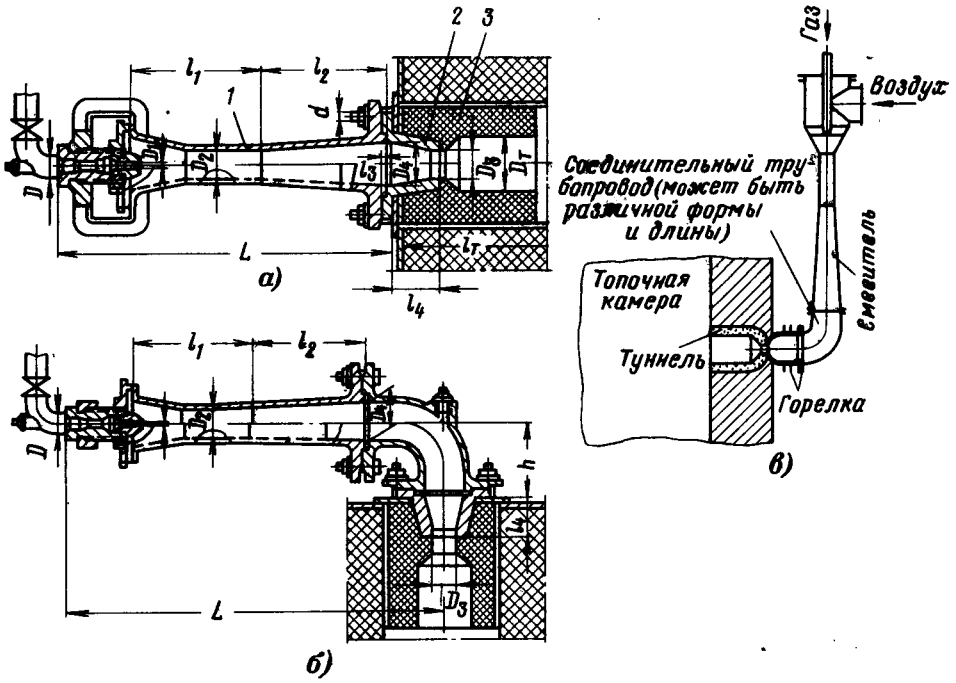


Рис. 3-4. Инжекционные горелки.

а — при расположении смесителя поперек фронта топки; *б* — при расположении смесителя вдоль фронта топки (угловая горелка); *в* — при работе на подогретом воздухе (или подогретых газе и воздухе).

Самый короткий факел получается при *инжекционных горелках*, особенно хорошо перемешивающих газ и воздух, почему такие горелки называют иногда *бесфакельными*. Конструкции таких горелок показаны на рис. 3-4. Газ, вытекая с большой скоростью из сопла в инжектор, засасывает воздух из атмосферы, причем подача воздуха может быть отрегулирована при помощи заслонки (шайбы). Это устройство для смешения газа с воздухом называется смесителем. Из смесителя газовоздушная смесь подается под некоторым напором в горелки, причем один смеситель может ставиться на одну или несколько горелок. Из горелок горючая смесь поступает в керамические туннели, расположенные в кладке печи, где сгорает с высоким пирометрическим эффектом. Назначение туннелей заключается в стабилизации воспламенения, т. е. в подогреве газовоздушной смеси, вытекающей из горелок, до температуры воспламенения. Материалом для туннелей служат огнеупоры, которые выдерживают воздействие высоких температур, развивающихся при полном сгорании газа с малыми избытками воздуха. Изменение состава материала туннелей практически не оказывает влияния на характер процесса горения газа. Ценным свойством инжекционных горелок является сохранение постоянства соотношения между расходами газа и воздуха при изменении их производительности.

Инжекционные горелки высокого давления могут успешно работать на подогретых газе и воздухе, что особенно желательно при сжигании низкокалорийного газа. В этом случае газ и воздух перед подачей в смеситель подогревают в рекуператорах за счет тепла дымовых газов, уходящих из печи. Температура газовоздушной смеси в этом случае должна быть значительно ниже температуры воспламенения во избежание горения газа внутри горелок. Обычно подогрев смеси не превышает 300—400 °С. Воздух может просасываться через рекуператор под действием разрежения, создаваемого струей инжектирующего газа, поэтому при инжекционных горелках не требуются вентиляторы для подачи воздуха в горелки и сокращаются воздухопроводы. На рис. 3-3,*в* показана инжекционная горелка для работы на подогретых газе и воздухе.

При небольших нагрузках горелки, когда скорость истечения газовоздушной смеси мала, происходит проскок пламени в горелку, сопровождаемый «хлопком», т. е. взрывом небольшого объема смеси в самой горелке. В больших закрытых горелках приходится устанавливать взрывные клапаны. Для надежности скорость истечения газовоздушной смеси из кратера горелки при ее наименьшей нагрузке во избежание проскока пламени берут в 2—3 раза больше скорости распространения пламени.

Величина наименьшего давления газа соответствует при обычных конструкциях (рис. 3-4) $p_1^{мин} = 5{,}0 \div 8{,}0$ *кн/м²*. Обычно инжекционные горелки строятся на среднее давление газа $p_1 = 5{,}0 \div 50$ *кн/м²* и более (до 100 *кн/м²*). Однако если принять особые меры к предотвращению проскока пламени путем установки в кратере горелки керамической пластины с многочисленными отверстиями диаметром 1—2 *мм* или пакета

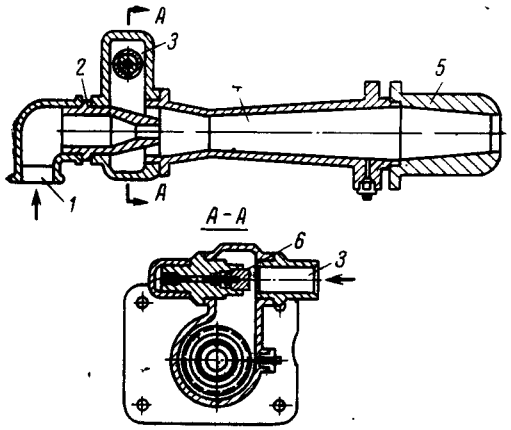


Рис. 3-5. Двухпроводная инжекционная горелка (воздух инжектирует газ).

1 — подача воздуха; *2* — воздушное сопло; *3* — подача газа; *4* — смеситель; *5* — носик горелки; *6* — газовый клапан.

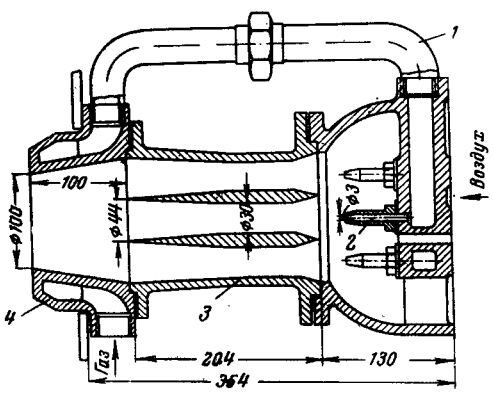


Рис. 3-6. Многосопловая инжекционная горелка ЗИЛ с головкой, охлаждаемой газом, поступающим на горение.

1 — газопровод подогретого газа; *2* — газовые сопла (7 шт.); *3* — смесители (7 шт.); *4* — газоохлаждаемая головка.

металлических пластин с промежутками 1,5 *мм*, то давление газа перед горелкой можно снизить до 1,0—3,0 *кн/м²*. Тепловая единичная производительность инжекционных горелок в зависимости от размеров, конструкции, давления газа и его теплоты сгорания изменяется от 0,1 до 1 *Мвт* и более (в отдельных установках до 10 *Мвт*).

Рассмотренные горелки относятся к однопроводным, поскольку воздух всасывается из атмосферы и к горелке подводится только газ. Но могут применяться *двухпроводные* инжекционные горелки, в которых инжектирующей средой является воздух и к горелке подходят два тру-

бопровода. В этом случае требуется установить регулятор, поддерживающий нулевое давление газа при входе в смеситель, что обеспечивает сохранение постоянного соотношения между количествами газа и воздуха.

При работе на природном газе, когда расход воздуха в 10—14 раз превышает по объему расход газа, для работы двухпроводных горелок требуется небольшое давление газа — всего 0,50—1,0 *кн/м²*.

Конструкция двухпроводной инжекционной горелки показана на рис. 3-5. Однако оборудование при таких горелках сложнее и дороже, а так как обычно давление при-

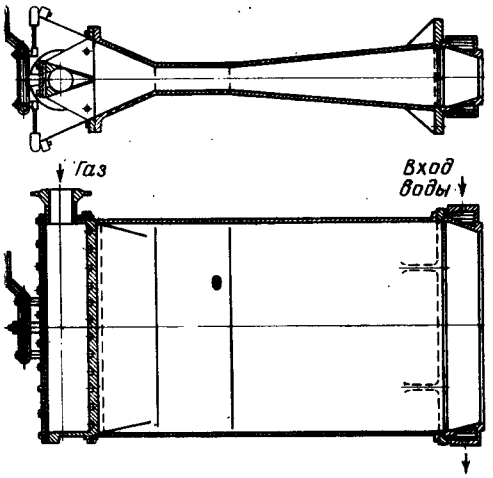


Рис. 3-7. Плоская многосопловая инжекционная горелка Куйбышевского политехнического института.

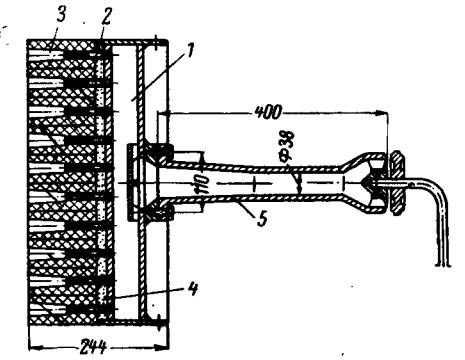


Рис. 3-8. Панельная бесфакельная горелка института Гипронефтемаш.

1 — распределительный короб газовоздушной смеси; *2* — стальная оправа; *3* — керамика; *4* — изоляция; *5* — смеситель.

родного газа на вводе в ГРП предприятия обеспечивает работу однопроводных горелок, то к установке двухпроводных горелок прибегают лишь в отдельных случаях.

На рис. 3-6 показана многосопловая горелка (ЗИЛ), в которой ряд инжекционных смесителей подает газовоздушную смесь в один кратер. Производительность таких горелок от 57 до 350 *м³/ч* по природному газу. Преимущество многосопловых смесителей состоит в том, что общая длина смесительного устройства получается значительно меньше, что представляет большие удобства для установки горелок. Еще более компактной является плоская многосопловая инжекционная горелка Куйбышевского политехнического института (рис. 3-7), требующая меньшего давления газа перед горелкой по сравнению с односопловой круглой (40—60 *кн/м²* вместо 50—120 *кн/м²*). Такие горелки строятся на единичную производительность до 1 000 *м³/ч* вместо 150 *м³/ч*, как у односопловой круглой.

Получили широкое распространение панельные бесфакельные горелки, разработанные институтом Гипронефтемаш первоначально для трубчатых печей нефтеперерабатывающих заводов. Их достоинство заключается в том, что сотовые панели (состоящие из множества огнеупорных керамических туннелей призматической формы 35×35×115 *мм*) при сжигании газа нагреваются и интенсивно излучают тепло на нагреваемую трубчатую поверхность или другие детали. На рис. 3-8 показана панельная горелка производительностью до 0,2 *Мвт*, состоящая из 100 туннелей, в которые газовоздушная смесь поступает от одного многосоплового смесителя. Длина смесителя составляет всего 380 *мм*, в то время как при односопловом смесителе эта длина была 1 400 *мм*. Панели вставляются в кладку стенок рабочей камеры печи и их излучающая поверхность может быть выполнена любой.

Тепловая производительность панельных горелок изменяется от 0,35 до 10 *Мвт*. Давление газа перед горелками, *кн/м²*:

Природный газ	10—50
Коксовый газ	3—10
Генераторный газ	1—3

Интересным является способ приготовления газовоздушной смеси в механических смесителях, создающих давление до 2 500 *мм вод. ст.* Эти смесители имеют форму центробежных вентиляторов или ротационных компрессоров, снабженных автоматическими регуляторами для поддержания соотношения газ — воздух. На рис. 3-9 показана

схема установки с центробежным вентилятором, на всасывающей стороне которого установлено устройство для регулирования соотношения газ — воздух, а на нагнетательной линии — регулятор давления смеси. Поскольку газовоздушная смесь взрывоопасна и ее объем в смесительном устройстве и трубопроводах значителен, для предотвращения переброски пламени в трубопроводы и смеситель устанавливают предохранительные аппараты. Газовоздушная смесь распределяется по трубопроводу к горелкам, представляющим в этом случае сопла, через которые газовоздушная смесь вдувается в горелочные туннели (амбразуры) в кладке печи.

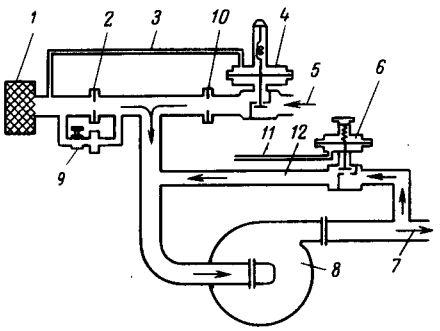


Рис. 3-9. Схема механического смешения газа и воздуха.

1 — воздушный фильтр; *2* — диафрагма для воздуха; *3* — импульсная трубка; *4* — регулятор давления газа в зависимости от давления воздуха; *5* — подвод газа; *6* — регулятор давления газовоздушной смеси; *7* — трубопровод газовоздушной смеси; *8* — центробежный вентилятор; *9* — ручной байпас; *10* — диафрагма для газа; *11* — импульсная трубка от потребителя; *12* — байпас.

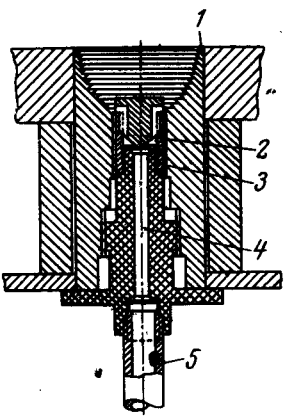


Рис. 3-10. Излучающая чашеобразная керамическая горелка.

1 — излучатель; *2* — керамическая пробка-распределитель; *3* — жароупорная муфта; *4* — канал газовоздушной смеси; *5* — подвод газовоздушной смеси.

В качестве горелок-излучателей, когда требуется равномерный рассредоточенный нагрев низкотемпературных поверхностей или рассредоточенный высокотемпературный нагрев деталей, применяются керамические горелки.

На рис. 3-10 показана чашеобразная керамическая горелка. Газовоздушная смесь проходит через пробку-распределитель, благодаря которой создается множество периферийных газовых струек диаметром 0,5—1 *мм*. После поворота струйки выходят на поверхность высокоогнеупорной чашки и сгорают, развивая температуру примерно до 1 700 °С. Тепловое напряжение объема чашки составляет 40—60 *Мвт*, до 70% тепла горелка передает излучением.

Производительность одиой горелкн небольшая (производительность горелки, изображенной на рисунке, составляет 0,9 *м³/ч* газа при давлении смеси 30,0 *кн/м²*), и поэтому керамические горелки собираются в группы (панели).

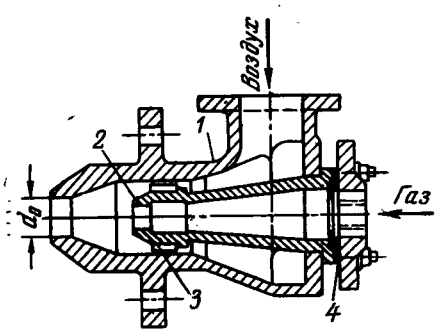


Рис. 3-11. Турбулентная горелка Теплопроекта.

1 — корпус; *2* — газовое сопло; *3* — завихривающие лопатки; *4* — шайба для дросселирования газа.

Из смесительных горелок в печах часто применяются турбулеитные горелки, в которых газовоздушная смесь закручивается при помощи завихривающих лопаток и других приспособлений. На рис. 3-11 показана турбулеитная горелка Теплопроекта для сжигания генераторного, смешанного, коксового и природного газов; в зависимости от их размеров производительность на природном газе составляет от 3 до 100 *м³/ч*, на коксовом газе от 6 до 85 *м³/ч* и при сжигании генераторного газа от 60 до 200 *м³/ч*. Давление газа составляет 0,5—0,8 *кн/м²*, давление воздуха 2,0 *кн/м²*. В случае, если давление газа превышает указанную величиину, вставляется дроссельиая шайба (перед входом газа в сопло). Горелка может работать на подогретых газе и воздухе. Длина факела составляет $l \approx (12 \div 15)d$.

В турбулентных горелках Стальпроекта (рис. 3-12) для усилеиия перемешивания воздуху придается вращательное движение посредством воздушной коробки, имеющей форму спиральной улитки. Эти горелки употребляются для холодного очищенного ге-

нераторного газа, коксового, доменного и природного газа. Потребное давление газа перед горелкой составляет до 9,0 *кн/м²*, давление воздуха до 7,0 *кн/м²*. Производительность горелок изменяется в зависимости от их размеров от 0,2 до 1,2 *Мвт* и более, основные детали горелок изготовляются из чугуна. Длина факела $l \approx (4 \div 7)d$.

Щелевые горелки (рис. 3-13) пригодны для сжигания очищенного или неочищенного (сырого) генераторного газа и других газов. Эти горелки пригодны также и для сжигания подогретого газа при подогретом воздухе, но в этом случае требуются большие давлении. Длина факела при холодном воздухе $l \approx 15d$, где d — диаметр устья горелки. Ввиду того что горелки выполняются чугунными, температура подогрева не должна превышать 300 °С.

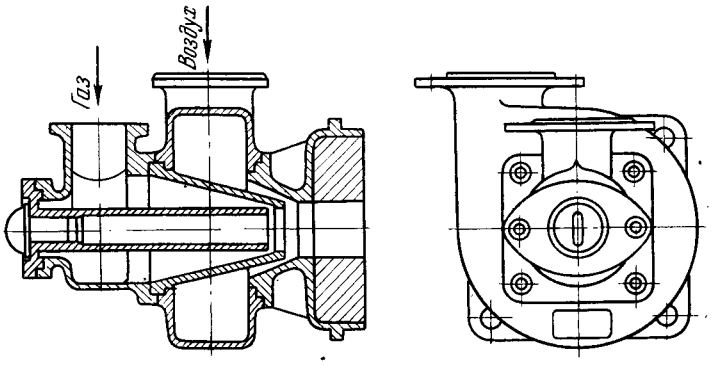


Рис. 3-12. Турбулентная горелка Стальпроекта.

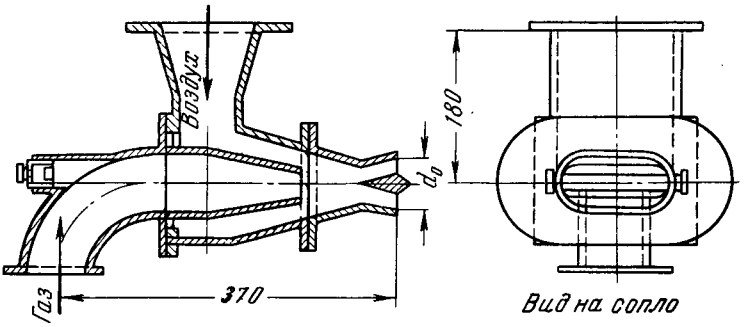


Рис. 3-13. Щелевая горелка Теплопроекта.

Специальными типами горелок для промышленных печей, которые внедряются в последнее время, являются:

а) горелки с высокой скоростью истечения (около 200 *м/сек*) на нагреваемые изделия (так называемые «атакующие» горелки), позволяющие вести скоростной нагрев изделий путем конвективной теплоотдачи к поверхности металла (рис. 3-14);

б) плоскопламенные горелки (рис. 3-15), при помощи которых можно вести сгорание газа в тонком слое, прилегающем к кладке свода; пламя получается плоским и растекается по значительной площади поверхности кладки. Такие горелки устанавливаются на сводах печей при косвенно-направленном радиационном режиме теплопередачи, весьма эффективном для нагревательных печей прокатного и кузнечного производства;

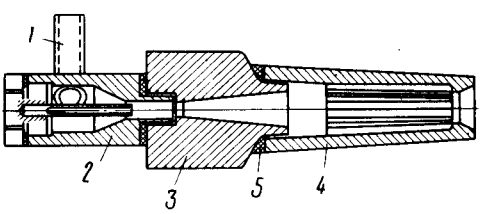


Рис. 3-14. Горелка с высокой скоростью истечения.

1 — тангенциальный ввод газовоздушной смеси; *2* — металлический корпус; *3* — сопло из огнеупора; *4* — камера сгорания из огнеупора; *5* — огнеупорное уплотняющее кольцо.

в) рекуперативные горелки для безокислительного нагрева (рис. 3-16), в которых воздух по-

догревается до 800 °С за счет отбора раскаленных газов из топочного пространства посредством инжектора. Горелки изготовляются из жаростойких сплавов и снабжены ребрами для увеличения поверхности нагрева с воздушной стороны;

г) горелки с электрическим нагревом воздуха, с ионизирующими присадками к нему. На рис. 3-17 показана такая горелка, которая позволяет создать температуру в печи до 2 750 °С.

Еще более высокой температуры—3 000 °С — можно достичь в электрогазовой горелке путем наложения на факел электрического переменного поля (рис. 3-18).

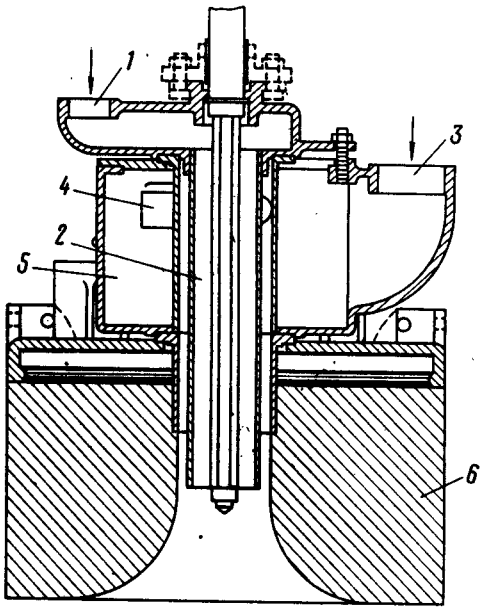


Рис. 3-15. Плоскопламенная горелка.

1 — подвод газа; *2* — закрученный поток газа; *3* — воздух; *4* — тангенциальные прорези; *5* — воздушная коробка; *6* — фасонный кирпич.

При производительности горелки 0,3 *Мвт* требуется электрическая мощность всего 100 *квт* при напряжении 10 *кв*. При высокой температуре продукты сгорания ионизируются и становятся электропроводными.

В тех случаях, когда в рабочем пространстве нет условий для

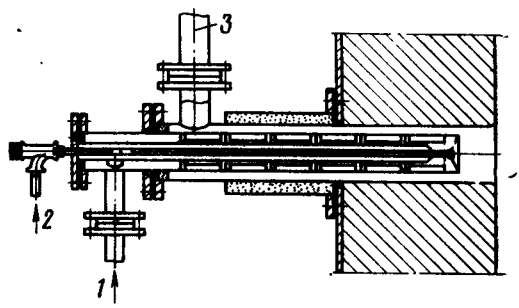


Рис. 3-16. Горелка для печей безокислительного нагрева.

1 — подача воздуха; *2* — газ; *3* — отсос газов из зоны горения.

правильного сжигания природного и других горючих газов, например в шахтных печах (в том числе в чугунолитейных вагранках), рабочая камера заполнена медленно опускающейся кусковой шихтой и при необ-

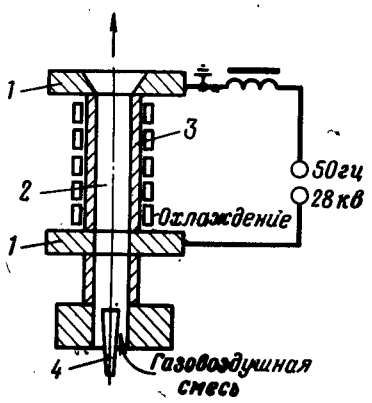


Рис. 3-17. Горелка с электрическим нагревом воздуха.

***1* — электрод; *2* — газовый канал; *3* — керамическая труба; *4* — запальник.**

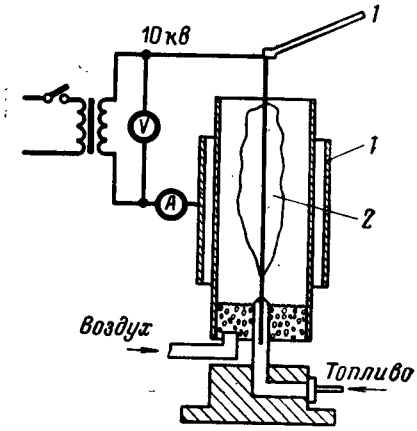


Рис. 3-18. Принцип действия горелки с наложением на факел электрического поля.

1 — электрод; *2* — факел.

ходимости сжигания газа в качестве основного или дополнительного топлива устанавливаются *вихревые горелки с форкамерой* (рис. 3-19), отличительной особенностью которых является закручивание воздушного потока посредством завихривающей вставки и подача газа на входе в камеру сгорания. В камере создаются очень высокие температуры (особенно при подаче горячего воздуха), и поэтому стальная камера изнутри покрывается слоем высокоогнеупорной обмазки, укрепленной на шипах из жаростойкого металла. Слой обмазки не должен быть большим. Камера имеет водяную рубашку, но вместо водяного может быть применено и испарительное охлаждение.

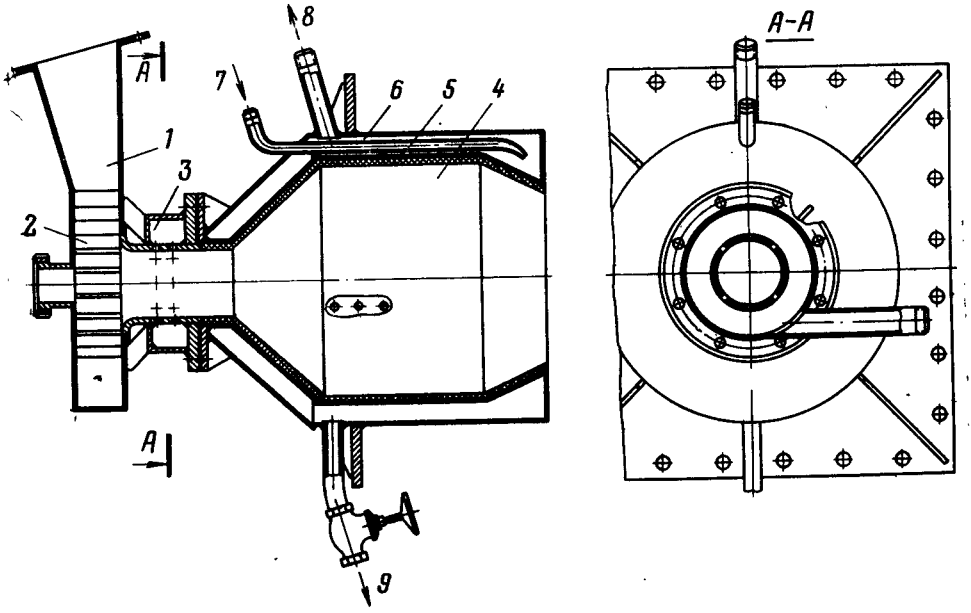


Рис. 3-19. Вихревая газовая горелка для сжигания газа с форкамерой.
1 — корпус воздушной улитки; *2* — завихритель воздуха; *3* — газовая коробка с отверстиями для прохода газа; *4* — камера сгорания; *5* — футеровка на шипах, приваренных к корпусу; *6* — рубашка водяного (или испарительного) охлаждения; *7* — подвод воды; *8* — отвод воды; *9* — слив шлама.

Более простой конструкцией газовой горелки того же назначения при использовании высокотемпературного дутья воздуха является *циклонная камера,* аналогичная по устройству мазутной циклонной камере, изображенной на рис. 3-28 (форсунки заменяются газовыми соплами). В печах безокислительного нагрева стальных заготовок циклонные камеры используются в качестве топок для реформации природного газа, т. е. для получения защитного газа путем сжигания его с коэффициентом расхода воздуха $\alpha = 0{,}4 \div 0{,}6$.

В качестве топок для реформации природного газа получают распространение топки с «кипящим» слоем промежуточного инертного теплоносителя (шамотная, корундовая, карборундовая крупа). В таких топках благодаря особенностям «кипящего» слоя процесс реформации идет особо устойчиво с широким изменением коэффициента расхода воздуха $\alpha = 0{,}1 \div 0{,}5$.

3-5. ОСОБЕННОСТИ СЖИГАНИЯ МАЗУТА В ПЕЧАХ

Мазут представляет собой остаток переработки нефти (перегонки и крекинга), назначением которой является выделение из нефти светлых продуктов (бензина, лигроина, газолина, керосина и масел). По мере развития нефтеперерабатывающей промышленности глубина отбора свет-

лых продуктов и соответственно вязкость мазута увеличиваются. Мазуты делятся по маркам в зависимости от вязкости, определяемой при помощи вискозиметров. Имеются марки М40, М100, М200 и для мартеновских печей МП. Цифры указывают наибольшее значение вязкости в градусах условной вязкости (ВУ) при температуре 50 °С. Например, марка М40 означает, что вязкость мазута не превышает 40° ВУ при температуре 50 °С. Величина вязкости топлива имеет большое значение в эксплуатации — при сливе мазута, при перекачке его по трубам,

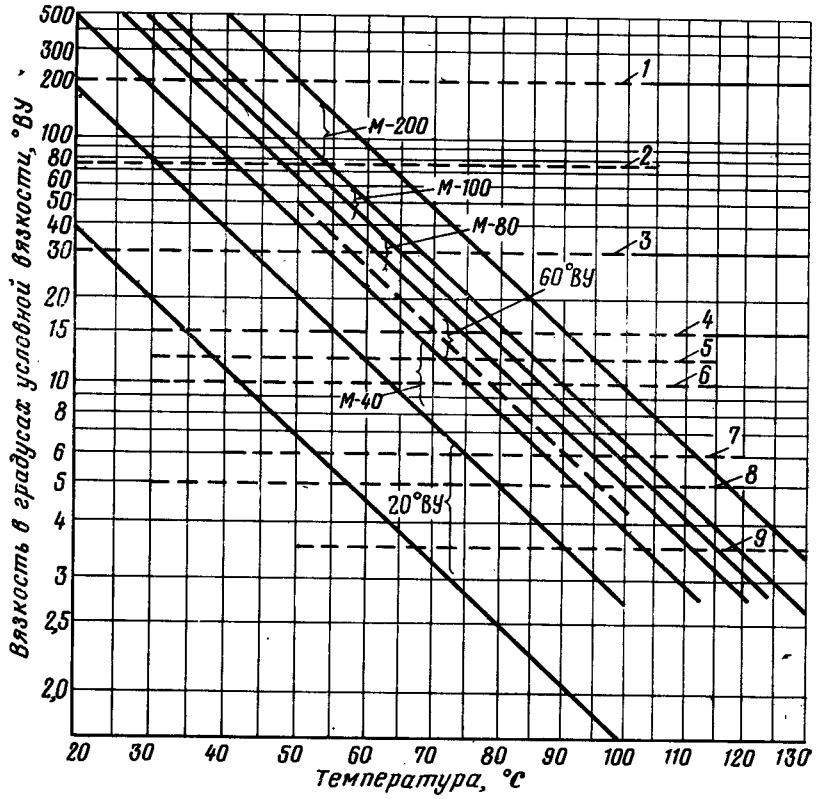


Рис. 3-20. Зависимость вязкости от температуры для мазутов.

1 — предельная вязкость мазута для винтовых и шестеренчатых насосов; *2* — то же для поршневых и скальчатых насосов; *3* — то же для центробежных насосов производительностью 20—40 *т/ч*; *4* — то же для паровых форсунок; *5* — то же для воздушных вентиляторных форсунок; *6* — то же для воздушных компрессорных форсунок; *7* — предельная вязкость мазута для механических форсунок и рекомендуемая вязкость для паровых форсунок; *8* — рекомендуемая вязкость мазута для воздушных вентиляторных и компрессорных форсунок; *9* — то же для механических форсунок.

а также при подаче к форсункам, так как текучесть мазута — величина, обратно пропорциональная вязкости. На рис. 3-20 даны значения условной вязкости для мазутов разных марок в зависимости от температуры; чем выше температура, тем меньше вязкость.

Второй важной характеристикой мазута является *температура застывания*, при которой мазут загустевает и теряет свою подвижность. Температура застывания мазута колеблется от 5 до 36 °С (первая температура относится к мазуту марки М40, а вторая к мазуту марки М200). Увеличение температуры застывания мазута и его вязкости иногда вызывается содержанием парафина, однако парафинистые мазуты в настоящее время применяются редко.

Температура вспышки паров мазута при его нагревании составляет от 80 до 140 °С, увеличиваясь по мере увеличения вязкости, и характе-

ризует мазут с точки зрения пожарной безопасности. Температуру вспышки паров мазута не следует путать с температурой воспламенения, которая для мазута составляет 367—417 °С.

Мазуты делятся на *малосернистые* с содержанием серы по рабочей массе не более 0,5%, *сернистые* — от 0,5 до 2,0% и *высокосернистые* — от 2 до 3,5%. Высокосернистые мазуты получаются в основном при переработке нефтей восточных и северных месторождений. Высокое содержание серы затрудняет или исключает возможность применения высокосернистых мазутов в сталеплавильных печах, в печах для вторичного рафинирования меди и при термической обработке металлов, так как диффузия серы в металл в условиях высоких температур резко ухудшает его качество. Обессеривание мазутов возможно на НПЗ до 0,5—1% путем гидроочистки остатков, но это требует больших затрат на реконструкцию заводов и сильно удорожает мазут.

При сжигании высокосернистых мазутов, как известно, получается помимо CO_2, H_2O, N_2 и O_2 также сернистый ангидрид SO_2 и в небольшом количестве серный ангидрид SO_3, образующийся по реакции $SO_2+{}^1/_2O_2=SO_3$ в условиях избытка воздуха при температурах от 1 200 до 400 °С. При конденсации продуктов сгорания в результате взаимодействия SO_3 с H_2O образуется серная кислота H_2SO_4, которая вызывает коррозионное разрушение металлических поверхностей теплообменников. Поэтому важно знать температуру точки росы, т. е. начала конденсации паров, содержащихся в продуктах сгорания, и не допускать запотевания поверхностей нагрева (выпадение влаги на поверхности зависит также и от температуры поверхности). Опыты показывают, что концентрация SO_3 в дымовых газах определяется не только содержанием серы в топливе, но и условиями горения в топке, наличием окиси углерода в газах и другими факторами. Так, например, если при коэффициенте избытка воздуха $\alpha=1{,}1$ в SO_3 выгорает около 3,6% серы топлива, то при $\alpha=1{,}7$ около 7%. Следовательно, имеет важное значение полное сгорание мазута с минимальным избытком воздуха. При несовершенном сжигании мазута образуется сажистый (дисперсный) углерод, который каталитически ускоряет приведенную выше реакцию образования SO_3.

Точка росы для высокосернистых мазутов изменяется в зависимости от условий и составляет приблизительно 160 °С; очевидно, что чем ниже точка росы, тем в лучших условиях будут работать хвостовые поверхности нагрева. Для подавления окислительных процессов, для получения рыхлых, сыпучих отложений взамен плотных применяются специальные присадки — жидкие, твердые и газообразные. Жидкие присадки (ВНИИНП-102 и др.) добавляются к мазуту, а твердые (магнезитовые и доломитовые порошки) — вдуваются в газовые потоки.

Эффективным и сравнительно недорогим средством для снижения точки росы является ввод аммиака NH_3 в дымовые газы при температуре около 350 °С. Аммиак, соединяясь с парами воды, образует нашатырный спирт NH_4OH, а последний реагирует с серной кислотой по уравнению

$$2NH_4OH+H_2SO_4=(NH_4)_2SO_4+2H_2O. \qquad (3\text{-}10)$$

В результате получается сернокислый аммоний, который для металла не является агрессивным продуктом.

Кроме серы, в мазуте имеются вредные ванадий и натрий, вызывающие высокотемпературную коррозию.

Содержание воды в топочном мазуте не должно превышать 2%, но при подогреве мазута острым паром при сливе его из железнодорожных цистерн оно увеличивается до 5% и более. Вода отделяется от мазута путем отстаивания в нефтехранилищах в подогретом состоянии; этот

процесс идет медленно, так как плотность мазутов близка к плотности воды.

Основные направления использования сернистых мазутов в печах. Рациональное использование высокосернистых мазутов может идти двумя путями: во-первых, путем полного сжигания мазута с коэффициентом избытка воздуха, близким к единице, при помощи наиболее совершенных топочных устройств и, во-вторых, путем местной газификации в особых устройствах (в предтопках), а также централизованной газификации. В последнем случае горячий газ, выдаваемый газогенераторами, подвергается очистке от сажи и от сероводорода, а затем сжигается в рабочем пространстве крупных печей с большим расходом мазута (мартеновские печи, крупные нагревательные и другие). Техника централизованной газификации изложена ниже, в гл. 11.

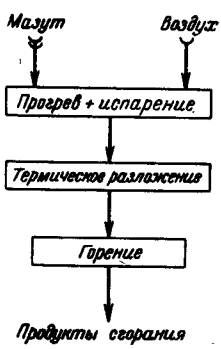


Рис. 3-21. Поточная схема выгорания жидкого топлива.

В высокотемпературных печах мазут сжигается в рабочих камерах при помощи форсунок. Процесс сжигания состоит из пульверизации (распыливания), испарения и термического разложения мазута, смешения полученных продуктов с воздухом, зажигания смеси и горения (рис. 3-21). Цель пульверизации заключается в том, чтобы увеличить поверхность соприкосновения жидкости с воздухом и газами в несколько тысяч раз; благодаря этому капельки мазута очень быстро испаряются и подвергаются термическому разложению за счет сильного излучения горящего факела. Распыливание совершается за счет кинетической энер-

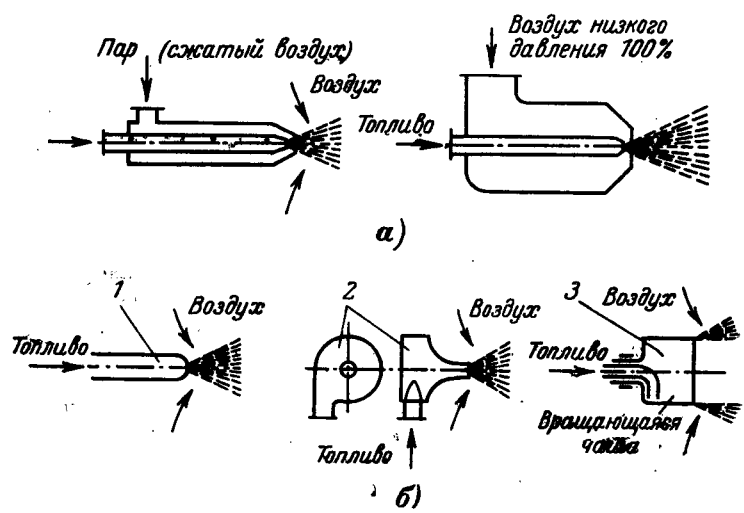


Рис. 3-22. Схемы форсунок для жидкого топлива.
а — форсунки с распыливающей средой; *б* — механические форсунки; *1* — прямоструйная; *2* — центробежная; *3* — вращающаяся.

гии распыливающего агента, в качестве которого применяется либо воздух, подаваемый компрессором в форсунки высокого давления или вентилятором в форсунки низкого давления, либо пар. Применяются также механические форсунки, в которые мазут подается при давлении и распыливание производится за счет энергии давления мазута и центробежных сил. Принципиальные схемы форсунок показаны на рис. 3-22.

Для обеспечения хорошего сжигания большое значение имеет способ подвода воздуха к факелу. Наиболее рационально весь воздух подавать принудительно к корню факела, обеспечивая этим хороший контакт воздуха с топливом (рис. 3-23).

Распыливание паром неэкономично. Кроме того, пар несколько понижает температуру факела. Поэтому более распространенными являются воздушные форсунки высокого давления и воздушные форсунки низкого давления, которые наиболее экономичны и получили на печах большее распространение.

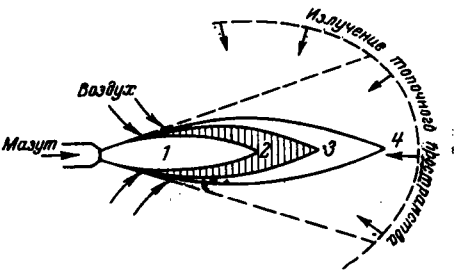


Рис. 3-23. Схема мазутного факела.
1 — зона испарения; *2* — зона разложения (крекинга); *3* — зона горения; *4* — продукты горения.

Наиболее старая, но надежная конструкция форсунок — паровая форсунка Шухова — показана на рис. 3-24,*а*. При хорошей настройке эта форсунка работает с хорошими показателями. На рис. 3-24,*б* изображена схема паровой форсунки МФПР, отличающейся от предыдущей лучшими показателями (меньший расход пара на распыливание и более полное сгорание мазута).

На рис. 3-25 показаны мазутные воздушные форсунки высокого давления Доброхотова — Казанцева и Уральского политехнического института. Первая из них обычно устанавливается на небольших печах, вторая — на крупных мартеновских печах. Воздух к форсункам подводится от компрессора с давлением 0,6 *Мн/м²* (сжатый воздух желательно подогревать до 200—300 °С). По сравнению с другими форсунка УПИ дает более интенсивное свечение факела с высокой радиацией, что имеет большое значение для мартеновских печей.

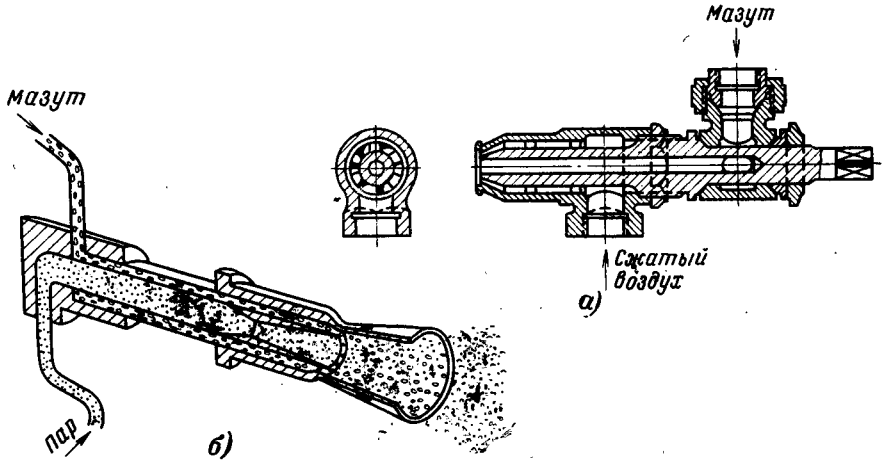


Рис. 3-24. Паровые форсунки.
а — форсунка Шухова; *б* — форсунка МФПР.

Высокие показатели имеют ротационные форсунки. На рис. 3-26 изображена такая форсунка, представляющая по существу форсуночный агрегат, состоящий из осевого вентилятора, приводимого в движение электродвигателем с регулируемым числом оборотов, и собственно воздушной форсунки низкого давления с двойным распыливанием. Форсунка имеет широкие пределы регулирования производительности 20÷140% и снабжается устройством для автоматического регулирования.

Такие форсунки в СССР выпускаются таллинским заводом «Терае», они хорошо работают на печах (за исключением регенеративных), где не требуется иметь длинного светящегося факела.

Устройство механической форсунки видно на рис. 3-27. Распыливание происходит за счет энергии давления мазута, вытекающего из форсунки через небольшое отверстие. Для усиления эффекта распыливания

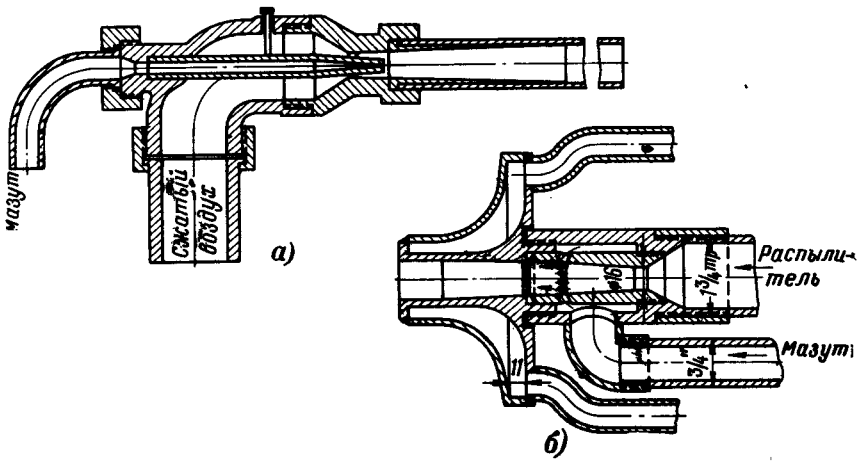


Рис. 3-25. Воздушные форсунки высокого давления.
а — форсунка Доброхотова—Казанцева; *б* — форсунка УПИ-К-15 (Кокарева).

в форсунке имеется завихривающий диск *2*, имеющий желобки, расположенные тангенциально. Мазут в механические форсунки подается тщательно профильтрованный, так как выходные отверстия форсунки имеют малые размеры и легко засоряются. Давление мазута перед форсунками составляет 1—2,5 *Мн/м*² и более.

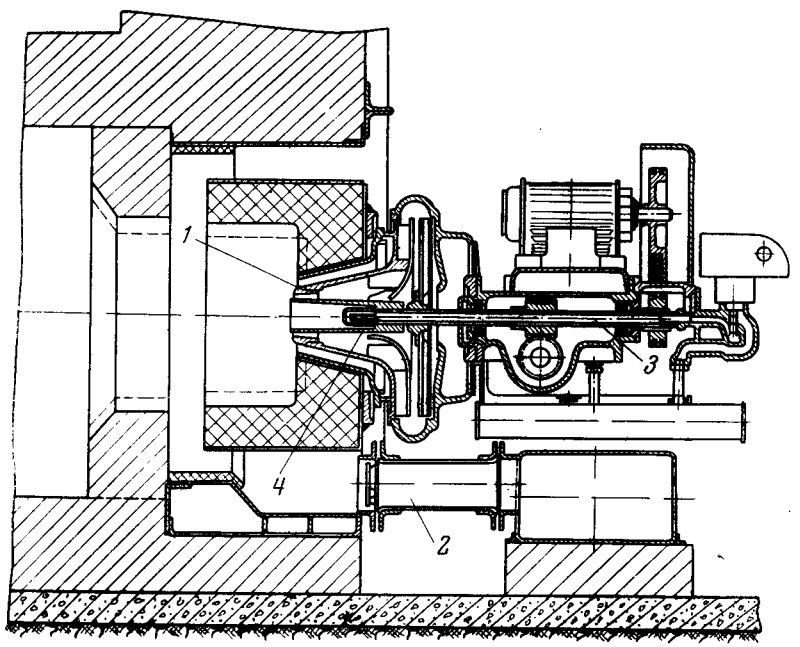


Рис. 3-26. Ротационная мазутная форсунка с пределами регулирования 5 : 1.
1 — первичный воздух; *2* — вторичный воздух осевого вентилятора; *3* — подача мазута; *4* — вращающийся конус для создания тонкой пленки мазута.

Сравнительная характеристика форсунок, применяющихся в промышленности, дана в табл. 3-1, где указаны преимущества и недостатки отдельных конструкций.

Эксплуатация форсунок показала, что для удовлетворительного сжигания крекинг-мазуты должны подогреваться настолько, чтобы вязкость перед форсункой была не более: при паровом распыливании, а также при распыливании сжатым воздухом $ВУ_{50}=15°$, при распыливании воздухом от вентилятора $ВУ_{50}=10\div12°$, при механическом распыливании $ВУ_{50}=6°$. Из кривых рис. 9-18 видно, что мазут при $ВУ_{50}=80°$ пригоден для механического распыливания при подогреве его до 100 °С, а для других видов распыливания—при подогреве до 80—85 °С. Такой подогрев не является опасным, так как температура вспышки мазута равна 150 °С. Высокая температура застывания создает некоторые затруднения в эксплуатации, которые преодолеваются повышенным подогревом мазута.

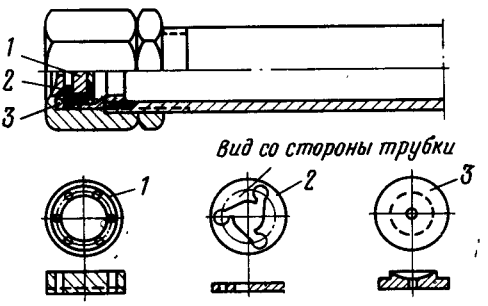


Рис. 3-27. Механическая форсунка ЦККБ.
1 — распределительный диск; *2* — завихривающий диск; *3* — насадка.

Наиболее совершенное сгорание сернистых мазутов при избытках воздуха, близких к единице, может быть достигнуто в циклонных камерах (рис. 3-28), в которых обеспечивается хорошее смесеобразование распыленного мазута с воздухом. Благодаря центробежному эффекту

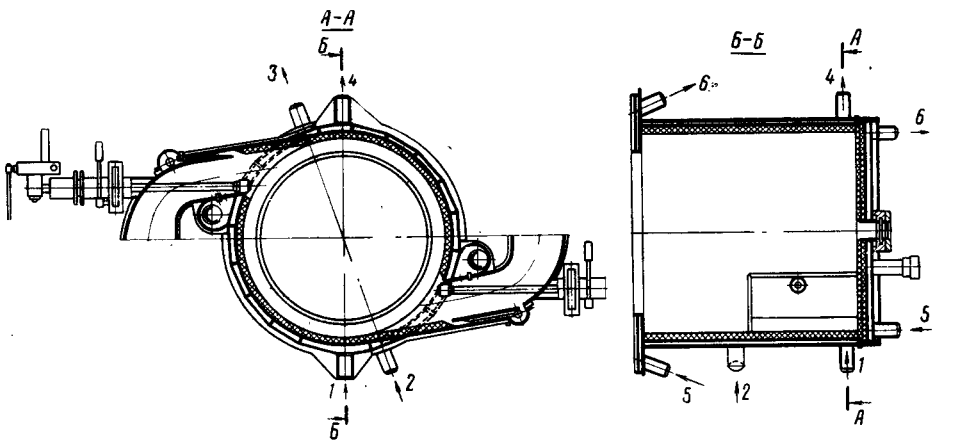


Рис. 3-28. Циклоиная камера для сжигания мазута или природного газа.
1 — вход воды в левую часть; *2* — вход воды в правую часть; *3* — выход воды из левой части; *4* — выход воды из правой части; *5* — подвод воды; *6* — отвод воды.

закрученных потоков воздуха и газов обеспечивается интенсивное горение жидкого топлива без сажеобразования при малых коэффициентах избытка воздуха $\alpha=1{,}02\div1{,}03$ (даже при нетонком распыливании мазута механическими форсунками). Интенсивность сжигания характеризуется высокими значениями тепловых напряжений объема и при скорости тангенциального ввода воздуха $\omega_в=10$ *м/сек* составляет:

$$q_v=\frac{BQ_н^р}{\frac{\pi D^2}{4}L}\approx 12\div15\ \ Мвт/м^3. \qquad (3\text{-}11)$$

Таблица 3-1

Сравнительная характеристика отечественных форсунок

Тип форсунок	Распылитель	Расход распылители	Типовые конструкции	Преимущества	Недостатки	Область наибольшего применения
Паровые	Слегка перегретый пар $p=0{,}4 \div 0{,}6$ *Мн/м²*	$D=0{,}3 \div 0{,}8$ *кг* пара на 1 *кг* топлива	Шухова, МФПР (завода „Ильмарине"), ВТИ, ЦКТИ	Низкая начальная стоимость оборудования, простота обслуживании, большие пределы регулирования	Малая экономичность, шум при работе	Котельные установки
Воздушные высокого давления	Сжатый воздух, $p=0{,}6 \div 0{,}8$ *Мн/м²*	$D=1{,}0 \div 1{,}5$ *кг* воздуха на 1 *кг* топлива	Шухова, Доброхотова-Казанцева, УПИ (Кокарева), Карабина	Простота обслуживания, большие пределы регулирования, экономичность выше паровых	Высокая начальная стоимость вследствие необходимости установки компрессора	Промышленные печи
Воздушные низкого давлении и ротационные (форсуночные агрегаты)	Сжатый воздух, $p=3{,}5 \div 10{,}0$ *кн/м²*	$D=(0{,}6 \div 0{,}85)\,L$ *кг* воздуха на 1 *кг* топлива (L—теоретический расход воздуха на горение, кг на 1 *кг* топлива). Для ротационных форсунок $D=(0{,}2 \div 0{,}6)\,L$	Роквелл, Оргэнергонефти, Стальпроекта, Союзтеплостроя, Карабина, ротационные вращающиеся (форсуночные агрегаты)	Высокая экономичность, высокий пирометрический эффект в силу полноты сгорания и малого коэффициента избытка воздуха, легкая возможность автоматизации	Значительные геометрические размеры форсунок	Промышленные печи (кроме регенеративных)
Механические	Давление мазута перед форсункой $p=1 \div 2{,}5$ *Мн/м²*	—	МФПР, завода „Ильмарине"	Высокий пирометрический эффект при работе с дутьем, бесшумиость	Громоздкость оборудования, засоряемость, регулирование производительности количеством действующих форсунок	Котельные топки и промышленные печи

Здесь D — внутренний диаметр циклона; L — длина камеры ($L/D=1\div1{,}2$).

Аэродинамическое сопротивление циклона определяется по формуле

$$\Delta p=\xi_{ц}\frac{\omega_{в}^{2}}{2}\rho,\ н/м^{2}, \qquad (3\text{-}12)$$

где $\xi_{ц}$ — коэффициент сопротивления циклона ($\xi_{ц}=4\div6$); $\frac{\omega_{в}^{2}}{2}\rho$ — скоростной напор, $н/м^{2}$.

Величина этого сопротивления — приблизительно 5—6 $кн/м^{2}$.

Циклонная камера по существу представляет собой полугазовую топку для мазута, в ней протекают газификационные процессы, и поэтому для дожигания газов по выходе из камеры используется рабочая камера печи или топочный объем. Глубина газификационных процессов

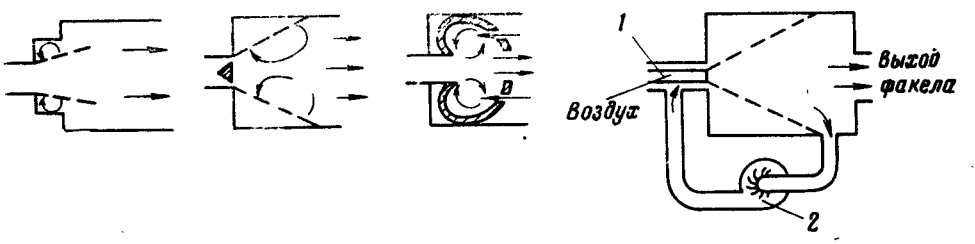


Рис. 3-29. Принципы рециркуляции газов в горелках.
1 — форсунка; *2* — вентилятор из жаростойкой стали.

зависит от подачи воздуха и величины его подогрева. При подаче в циклон не всего воздуха, нужного для горения, а только части, соответствующей коэффициенту расхода воздуха $\alpha=0{,}3\div0{,}5$, температура газа на выходе будет порядка 800—1 250 °С и теплота сгорания 5—10 $Мдж/м^{3}$ с содержанием сажистого углерода 3—6 $г/м^{3}$. В этих условиях циклон футеруется изнутри огнеупорным кирпичом.

При подаче всего воздуха, т. е. при коэффициенте избытка воздуха $\alpha=1{,}02\div1{,}03$, и при использовании горячего воздуха в камере достигаются очень высокие температуры и огнеупорная футеровка оплавляется и выходит из строя. Поэтому устраивается водяное или испарительное охлаждение корпуса циклонной камеры, а внутренняя часть покрывается тонким слоем высокоогнеупорной обмазки, укрепленной на шипах из жаростойкого материала. Расчет циклонной камеры приведен в пособии [Л. 5]. При сжигании мазута с малым избытком воздуха или при его недостатке (в печах безокислительного нагрева) происходит образование сажистого углерода. Причинами этого явления могут служить также: грубая пульверизация, недостаточная интенсивность смесеобразования, малая температура распыливающей среды. Эффективными средствами уменьшения сажеобразования являются (кроме средств, исключающих перечисленные причины) энергичная рециркуляция газов у корня факела, подогрев воздуха, идущего на сгорание, и высокое качество смесеобразования. На рис. 3-29 показаны принципиальные схемы рециркуляции газов, обеспечивающей интенсивное газообразование у самого корня факела. В печах применяются не только циклонные мазутные горелки с предварительной газификацией, но и другие, представляющие собою сочетание небольших камер сгорания с форсунками (рис. 3-30,*а*—*г*). Газификаторы позволяют получать полугаз, состав которого и температура зависят от глубины газификации, определяемой подачей окислителя, смесеобразования и циркуляцией газов. Полугаз

сжигается в рабочей камере печи без избытка воздуха, и для его сгорания требуются меньший объем камеры, чем при непосредственном сжигании мазута.

Успешное сжигание без сажеобразования производится при помощи *эмульсионных горелок*. Если капли воды, взвешенные в мазуте, име-

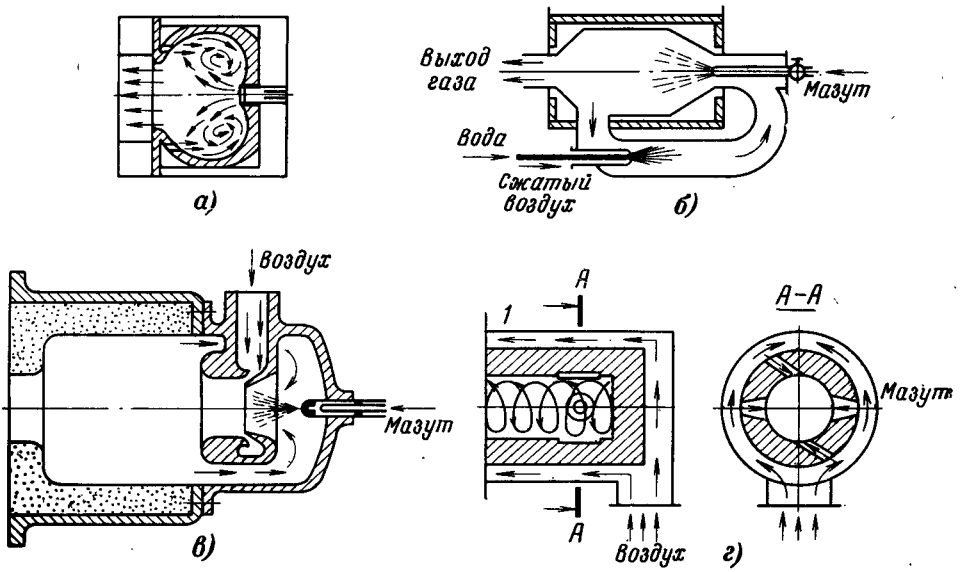


Рис. 3-30. Схемы горелок газификаторов (по В. Хансену).
а — с рециркуляцией газов; *б* — с форсированной рециркуляцией газов и впрыском воды; *в* — с энергичной рециркуляцией газов; *г* — циклонного типа; *1* — камера сгорания.

ют температуру, превышающую температуру кипения, то при выбросе струи происходит вторичное распыливание. Образующийся при термической диссоциации воды атомарный кислород реагирует с углеродом и окисляет его в окись углерода CO, а серу — в SO_2. Как следствие образуется меньшее количество SO_3, что уменьшает опасность низкотемпературной коррозии. На рис. 3-31 показана схема эмульсионной горелки.

Для уменьшения сажеобразования при сжигании мазута в полугазовых топках применяются также ультразвуковые форсунки, снабженные ультразвуковыми соплами, способными создать частоту от 10 до 40 *кгц*, т. е. в области, не улавливаемой человеческим ухом. Такие

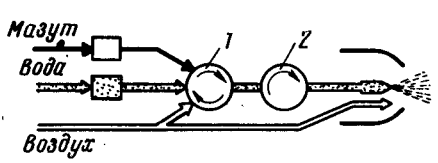


Рис. 3-31. Эмульсионное сжигание мазута.
1 — эмульгатор; *2* — насос.

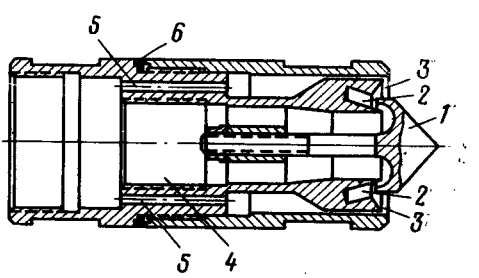


Рис. 3-32. Ультразвуковая форсунка.
1 — грибок; *2* — кольцевая резонансная камера; *3* — кольцевое выходное отверстие для мазута; *4* — подача газа; *5* — подача мазута; *6* — уплотнение.

форсунки имеют широкий диапазон регулирования (1 : 10). В ультразвуковом распылителе (рис. 3-32) поле колебаний создается за счет вытекания распыливающей среды из центрального отверстия в резонансную камеру, где она затормаживается и оказывает обратное давление

на поступающее топливо. Колебания распыливающей среды заставляют мазут втягиваться без давления. В результате происходит очень тонкое распыливание (размер капель менее 2 *мкм*) и безсажевое сжигание.

3-6. ОСОБЕННОСТИ СЖИГАНИЯ КУСКОВОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В ПЕЧАХ

Достоинством печей, отапливаемых газом, мазутом или угольной пылью, является постоянство температуры и состава газовой среды в рабочей камере. Это постоянство определяется непрерывностью поступления топлива в печь, неизменностью его состава и условий сжигания. В таких печах легко установить нейтральную или слегка восстановительную газовую среду, что часто бывает необходимым при нагреве металла. В печах же, работающих на кусковом твердом топливе, труднее добиться постоянства температуры и состава газовой среды в рабочей камере. Наибольшая неравномерность наблюдается при топках с периодической загрузкой топлива и периодической же чисткой топки. Указанный недостаток отсутствует у механических топок с непрерывной подачей топлива. Последовательность отдельных стадий процесса горения твердого топлива представлена на рис. 3-33.

Скорость гетерогенной реакции измеряется количеством углерода (в граммах), сгоревшего за 1 *сек* на 1 *см*^{2} активной поверхности топлива K_s, *г*/(*см*^{2} · *сек*). Эта величина помимо температуры, давления и концентрации реагирующих веществ зависит от скорости диффузии к поверхности окислителя. Можно себе представить, что вблизи поверхности частицы топлива в пограничном слое (рис. 3-34) концентрация реагирующих веществ уменьшается, а концентрация продуктов реакции (CO и CO_2) увеличивается. Этот пограничный слой газа толщиной δ препятствует подводу кислорода, и скорость реакции горения будет зависеть от скорости диффузии окислителя через пограничный слой.

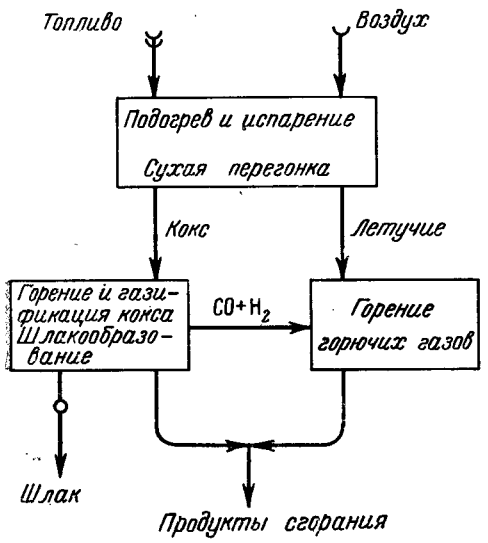


Рис. 3-33. Поточная схема выгорания твердого топлива.

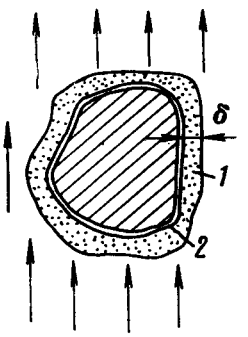


Рис. 3-34. Схема гетерогенного горения.
1 — пограничный слой газов; *2* — золовая корка.

Скорость диффузии зависит от толщины пограничного слоя, температуры и разности концентраций окислителя в потоке C_0 и на поверхности $C_п$. С другой стороны, толщина пограничного слоя зависит от скорости потока и приведенного диаметра частицы топлива. Как установлено выше, результирующая скорость реакции определяется тем, какой из составляющих процессов — диффузия или собственно реак-

ция — является лимитирующим. Горение натурального (технического) топлива зависит также от способа шлакоудаления. По мере выгорания углерода на поверхности частиц топлива образуется золовая корочка, затрудняющая доступ окислителя к поверхности углерода. Под действием высокой температуры зола может размягчиться, а кусочки топлива в плотном слое — соединиться (свариться). Слой, как говорят в таких случаях, зашлакуется, а горение топлива будет сильно затруднено в связи с прекращением доступа воздуха не только к топливу, лежащему на решетке, но и к горючим летучим в топочном пространстве. О склонности топлива к зашлаковыванию слоя судят по температурным характеристикам его золы. Для удаления золового нароста и для расшлакования слоя применяют шуровку, т. е. рыхление его. Удаление золы в жидком виде (что возможно в условиях высоких температур) позволяет интенсифицировать процесс горения кокса.

Помимо углекислого газа CO_2 в топочное пространство поступает и окись углерода CO. Последняя является первичным продуктом окисления углерода (наравне с углекислотой CO_2), кроме того, она получается в результате восстановления углекислоты в слое раскаленного углерода по реакции $CO_2+C=2CO$.

На рис. 3-35 показана схема выгорания кокса в слое, лежащем на колосниковой решетке. В каждом коксовом (углеродном) канале, продуваемом в горячем состоянии воздухом, образуется горючая смесь газов, состоящая из CO, CO_2 и воздуха. На определенном уровне от колосниковой решетки достигаются температура и концентрация газов, обеспечивающие устойчивый фронт воспламенения горючей смеси. Таким образом, каждый углеродный канал представляет как бы газовую горелку. В слое развивается в той или иной мере процесс газификации топлива.

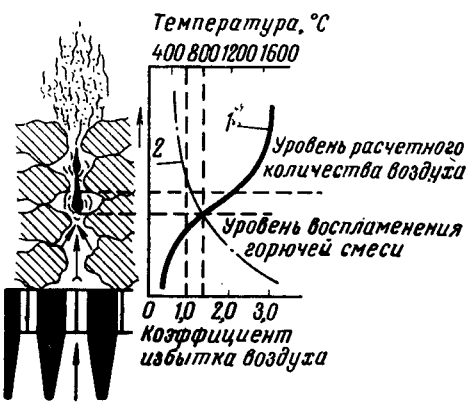


Рис. 3-35. Газификация кокса в межкусковых каналах слоя.

Под коэффициентом избытка воздуха понимают отношение фактически поданного в топку количества воздуха к теоретически необходимому количеству его. Этот коэффициент обозначают буквой α.
1 — кривая роста температуры; *2* — кривая падения коэффициента избытка воздуха.

На определенной толщине слоя от колосниковой решетки кончается окислительная зона, весь кислород смеси оказывается израсходованным и поток пронизывает уже восстановительную зону.

Классификация топок для твердого топлива. Эти топки характеризуются в первую очередь с аэродинамической стороны, в соответствии с чем они разделяются на: а) топки с плотным слоем; б) топки с «кипящим» слоем; в) факельные топки для сжигания пылевидного топлива; г) циклонные и вихревые топки (рис. 3-36).

В топках для кускового топлива с плотным слоем скорость обтекания неподвижных кусков равна скорости потока в слое w_0. В таких топках на колосниках лежит значительный запас топлива, соизмеримый с часовым расходом топлива, а в полугазовых топках — превышающий его в 2—4 раза. Наличие значительного количества горящего или подготавливающегося к горению топлива создает устойчивость процесса. Для изменения расхода топлива достаточно только изменить подачу воздуха, а изменение скорости горения топлива является простым следствием воздушной регулировки. Факельные топки для сжигания угольной пыли или мелкозернистых топлив во взвешенном состоянии харак-

теризуются малой скоростью обтекания частиц топлива потоком, т. е. обменом веществ на поверхности горящих частиц, что затрудняет выгорание топлива. Запас топлива в топке в этом случае очень мал, и для регулировки процесса следует одновременно изменять расходы как воздуха, так и топлива. Время пребывания топлива в факельных топках весьма ограниченно. Сжигание топлива в топках с кипящим слоем является промежуточным между сжиганием в плотном слое и в факеле. Такие топки применяются для сжигания мелкозернистого каменноугольного топлива.

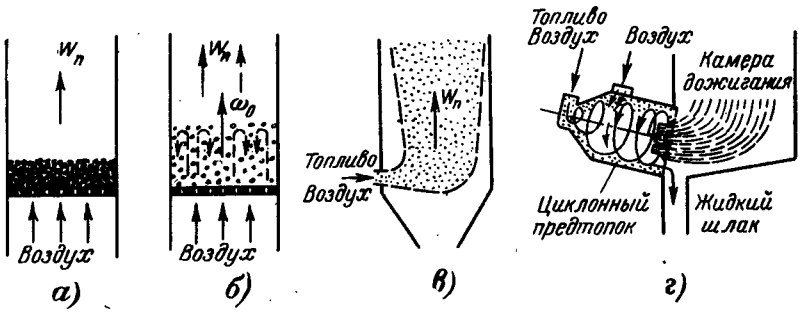


Рис. 3-36. Классификация топок для сжигания твердого топлива.
а — с плотным слоем; *б* — с кипящим слоем; *в* — факельная топка; *г* — циклонная топка.

Свое название кипящий слой получил из-за внешнего сходства движения слоя топлива с движением кипящей жидкости[1]. Топки с плотным слоем, а также топки с кипящим слоем устраиваются как с полным сгоранием газов в топочном объеме, так и как полугазовые. Особенность последних заключается в переносе горения газов в рабочее пространство печей, с тем чтобы развить там максимально высокую температуру.

В циклонных топках используются аэродинамические преимущества вращающегося газовоздушного потока, несущего взвесь измельченного топлива. Частицы топлива благодаря центробежному эффекту сильно турбулизируются и приобретают большие скорости относительно газа, так как частицы топлива энергично обдуваются; поэтому процессы горения и газификации протекают весьма интенсивно: тепловые напряжения циклонной камеры при сжигании углей достигают 3—6 *Мвт/м*^{3} и более вместо 0,2—0,3 *Мвт/м*^{3} для пылеугольных камерных топок. В циклонах улавливается до 80—90% всего шлака, причем если температурный уровень достаточно высок, удаление шлака может быть в жидком виде. Хорошее смесеобразование обеспечивает сжигание топлив с малыми коэффициентами избытка воздуха ($\alpha = 1{,}03 \div 1{,}1$). Имеется возможность работы на пыли грубого помола или даже на дробленом угле с размерами частиц 1—5 *мм*, так как частицы топлива вращаются в циклоне до тех пор, пока не сгорят почти полностью. Однако циклонные топки хорошо работают в условиях большой производительности только на углях высокого качества и поэтому у нас не получили пока широкого применения, особенно в промышленных установках, где преимущественно используются низкосортные угли.

Большое значение имеет механизация топочных процессов. Механизация трудоемких работ является характерной особенностью нашего социалистического хозяйства, а так как обслуживание ручных топок связано с весьма трудоемкими операциями, то для крупных печей должны применяться исключительно механизированные топки. Полумеханизированные топки могут применяться только для небольших печей.

[1] Более подробно о «кипящем» слое см. гл. 2 и 11.

Факельное сжигание твердого топлива с предварительным дроблением и помолом угля является приемом полной механизации топочного процесса и с этой стороны оценивается высоко. Сжигание каменных и бурых углей в циклонных топках и в топках с кипящим слоем с предварительным дроблением топлива также является полностью механизированным. Однако топки с кипящим слоем далеко не всегда могут быть применены для печей из-за значительных габаритов и большого выноса из топок золы и углерода.

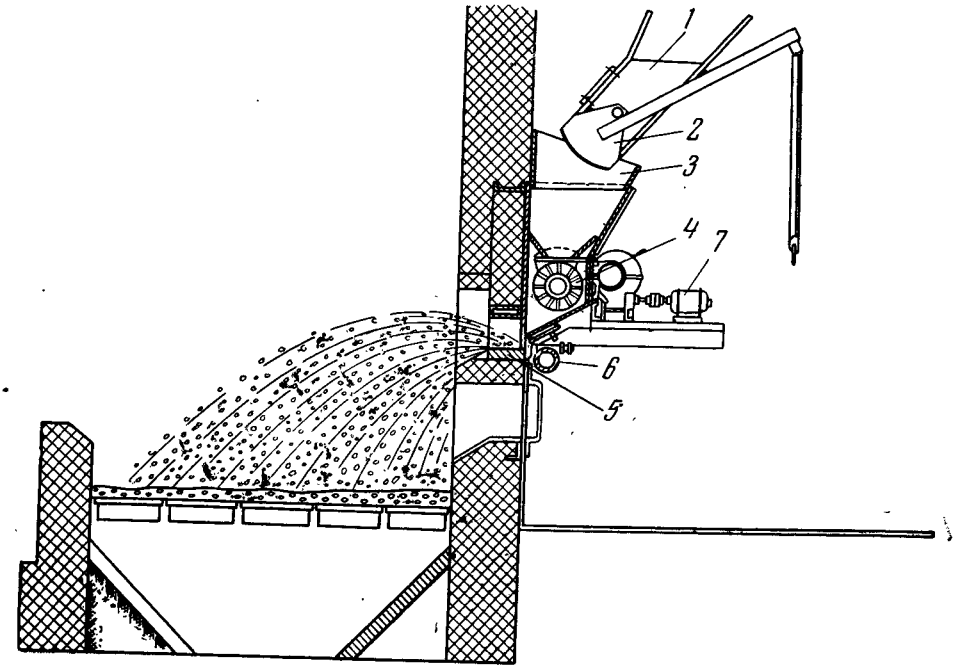


Рис. 3-37. Пневматический забрасыватель топлива.
1 — угольный буикер; *2* — секторный затвор; *3* — угольная воронка; *4* — барабанный питатель; *5* — распределительная плита с водяным охлаждением; *6* — воздушные сопла; *7* — мотор привода питателя.

В печах, отапливаемых твердым топливом, применяются также и топки с плотным слоем. В них механизируются следующие операции: а) подача топлива к топкам; б) заброс (загрузка) топлива в топки; в) шуровка слоя; г) удаление шлака и золы из топок; д) удаление золы из помещения, где установлены печи. Наиболее легко осуществляется механизация первой и последней операций. Вблизи топок устанавливаются бункера, куда топливо подается при помощи транспортеров, элеваторов, скиповых подъемников, тельферов и т. п. Нетрудно организовать золоудаление от топок в золовые приемники. Заброс топлива осуществляется механическими, пневматическими или пневмомеханическими забрасывателями. На рис. 3-37 изображен пневматический забрасыватель конструкции ВНИИТ. Наиболее трудно организовать шуровку слоя и удаление шлака и золы из топок. Шуровка слоя применяется для рыхления слоя из-за его спекания, а также для удаления золовой оболочки с поверхности горящего слоя, мешающей проникновению кислорода к горючему веществу топлива. Зола на поверхности горящих кусков, размягчаясь, приводит к шлакованию слоя.

На рис. 3-38 представлена схема *полугазовой топки* для сжигания твердого топлива в плотном слое. В топке происходит процесс газификации твердого топлива, который может идти с большей или меньшей полнотой в зависимости от температуры газоз и его теплоты сгорания. Косвенным показателем полноты газнфикации является содержание в полугазе двуокиси углерода CO_2: чем оно выше для данного топлива,

тем ниже теплота сгорания полугаза и выше температура в топке. Толщиина слоя топлива в полугазовых топках значительно больше, чем в простых топках с полным сгораиием, но меньше толщины слоя топлива в газогенераторах, работающих иа том же топливе. Так, при донецком антраците толщина слоя в простой топке составляет примерно 50—80 *мм*, в полугазовой 200—400 *мм*, в газогенераторе 1 000—1 500 *мм*. Для каменных и бурых углей толщиина слоя в полугазовых топках обычно составляет 400—800 *мм*. Температура в полугазовой топке (температура полугаза) при антраците составляет 1 000—1 100 °С вместо 500—600 °С, обычных для газа, выходящего из газогенератора. В полугазовой слоевой топке протекают те же процессы, что и в газогеиераторе, но они идут с меньшей полнотой, а отдельные зоны частью совмещены, что и сказывается на теплоте сгорания газа, которая в топках составляет обычно 2,5—3,5 *Мдж/м*³ вместо 4—5,5 *Мдж/м*³ для генераторного газа.

Полугаз перед выходом из топки в рабочую камеру печи смешивается со вторичным воздухом, и пламя направляется в рабочее пространство печи, которое в данном случае играет роль топочного объема для сжигания газа. Большую роль играет качество смешения газа с воздухом, так как известно, что само горение газа протекает почти мгновенно и продолжительность горения в целом определяется временем, необходимым для процесса смешения газа и воздуха.

На рис. 3-38 показан способ смешения, весьма распространенный в полугазовых топках: вторичный воздух подается в топку с большой скоростью (20—40 *м/сек*) при помощи ряда сопл; воздушные струи пересекают газовый поток и, как показывает опыт, обеспечивают хорошее смешение газа и воздуха, причем горение газа протекает интенсивно даже при малых коэффициентах избытка воздуха.

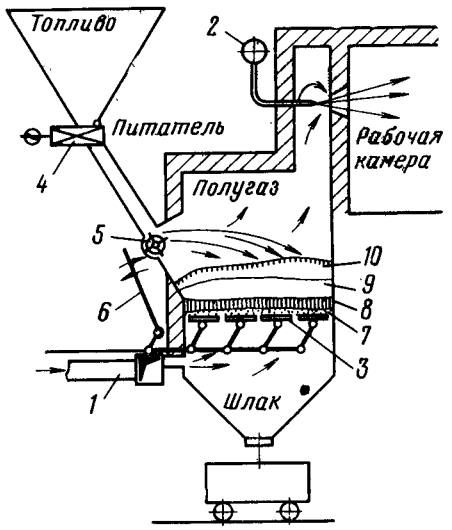


Рис. 3-38. Схема полугазовой топки для сжигания твердого топлива в плотном слое.

1 — подача первичного воздуха; *2* — подача вторичного воздуха; *3* — колосниковая решетка; *4* — питатель; *5* — забрасыватель; *6* — механизм для поворота колосников (встряхивания решетки); *7* — зона шлака; *8* — зона горения; *9* — зона восстановления; *10* — слой свежезаброшеиного топлива.

Определение необходимых размеров колосниковой решетки для полугазовых топок производится по допустимому напряжению решетки. Свободное пространство полугазовых топок играет роль коллектора и выбирается по конструктивным соображениям.

Полугазовые топки с нижней подачей (рис. 3-39,*а*) применяются в основном при сжигании умеренно спекающихся каменных углей. Здесь механизированы загрузка топлива и шуровка; шлак удаляется из слоя вручную. Схема горения каменного угля в реторте топки с нижней подачей показана на рис. 3-39,*б*.

В полугазовых топках при хорошем смешении газа с воздухом сжигание газа производится с иебольшими избытками воздуха ($\alpha=1{,}05\div1{,}15$), что очень важно при нагреве металла, так как снижение избытка воздуха уменьшает окисление поверхности нагретого металла. Кроме того, при этом уменьшаются потери тепла с дымовыми газами, что повышает к. п. д. печей.

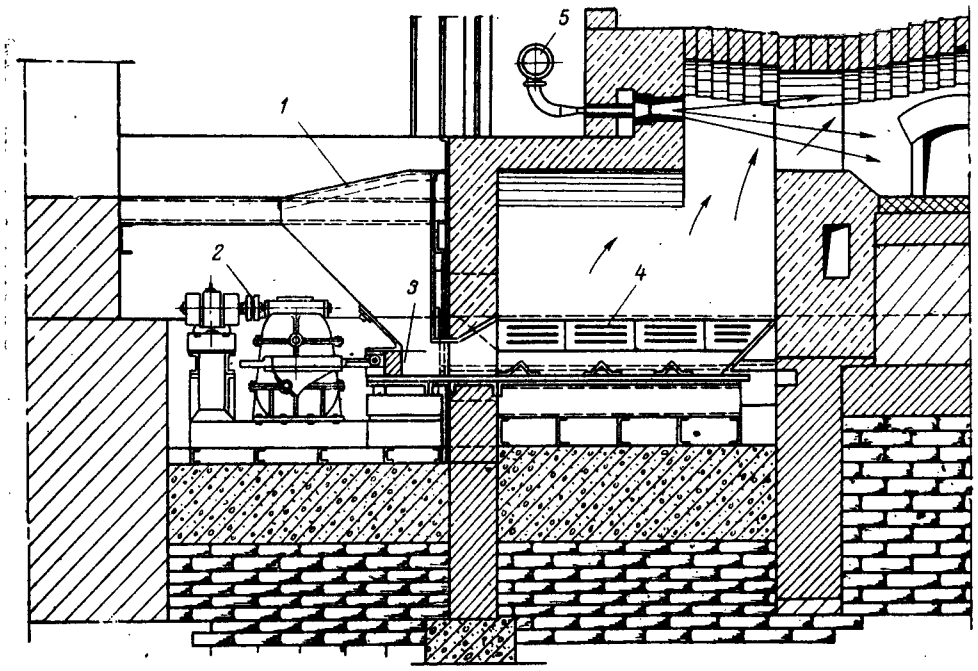
Полугазовые топки применяются главным образом при сжигании бурых и каменных углей, а также и антрацитов. При сжигании дров и торфа редко прибегают к полугазовому отоплению, так как длина факела вполне достаточна для заполиения пламенем рабочего пространства печи.

При сжигании твердого кускового топлива в промышленных печах в качестве полугазовой топки может быть использована и топка с «шурующей» планкой, получившая распространение в котельных устаиовках.

На рис. 3-38 показана полумеханизированная полугазовая топка, снабженная качающимися колосниками, которые приводятся в движение при помощи рычагов от руки или от мотора. Топка снабжена пневматическим забрасывателем. В таких топках механизированы заброс топлива, шуровка и удаление шлака под колосники.

В полугазовых топках для достижения равномерности газового потока в слое топлива сжигают сортированные угли и антрациты с небольшим содержаиием мелочи.

На рис. 3-40 показана наклоннопереталкивающая беспровальная решетка, прнменяемая в полугазовых топках. Эта решетка удобна для сжигания бурых углей с высокой зольностью и влажностью. При высококалорийном топливе колосники из-за плохого охлаждения часто пережигаются. Наклонная ступенчатая решетка имеет неподвижные, а также подвижные колосиики, приводимые в движение от системы рычагов.



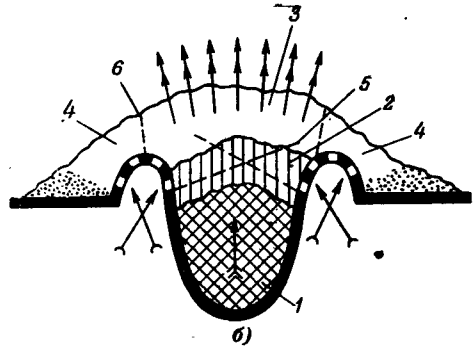


Рис. 3-39. Полугазовая топка с нижней подачей топлива.

а — продольный разрез: *1* — бункер для топлива; *2* — механизм для привода топки; *3* — поршень для подачи топлива в реторту; *4* — колосниковая решетка ретортного типа; *5* — подача вторичного воздуха; *б* — поперечный разрез по реторте: *1* — зона свежего топлива; *2* — зона образования газообразной горючей смеси; *3* — зона горения газообразной горючей смеси; *4* — зона горения кокса; *5* — нижняя граница распространения воздушного потока; *6* — граница зон горения летучих и горения кокса.

При возвратно-поступательном движении колосников топливо проталкивается и, сгорая, сползает вниз.

В полугазовых топках с кипящим слоем (рис. 3-41) эффективно используется угольная мелочь с размером кусочков от 2 до 12 *мм*, что является большим преимуществом, так как при этом могут быть использованы рядовые и мелкозернистые бурые и каменные угли. Интенсивность горения топлива в кипящем слое сильно возрастает по сравнению с горением в плотном слое крупнокускового угля той же марки. Это объясняется не только увеличением удельной поверхности окисления топлива, но и постоянным «обновлением» его поверхности благодаря удалению с нее образующейся

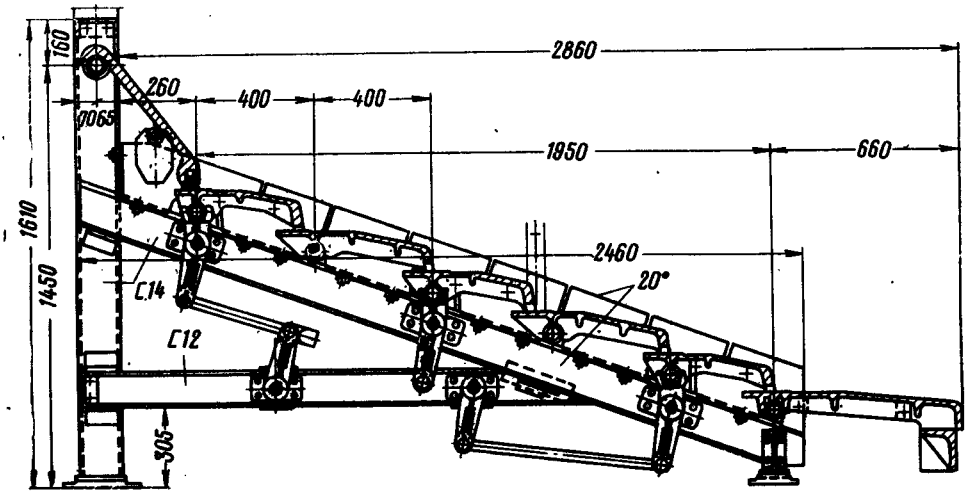


Рис. 3-40. Наклонно-переталкивающая решетка ЦКТИ.

золы, что обеспечивает доступ окислителя к поверхности углерода. Благодаря интенсивной пульсации частиц, их вращению и соударениям топливо дробится и истирается в мельчайшую пыль, которая увлекается потоком газов и воздуха вверх, где подвергается газификации и дожиганию.

Температура слоя должна быть такой, чтобы избежать шлакования частиц, и регулируется она вводом пара в количестве 0,30—0,60 *кг/кг*. Возможна замена пара водой, распыленной при помощи пульверизаторов (расход воды 0,2—0,3 *кг/кг*). Недостатком топки является большой вынос углерода—до 20—30% всего углерода топлива, причем крупность уносимых частиц составляет 0—1 *мм* (в основном 0,5 *мм*). Поэтому топка может применяться при возможности дожигания уноса в рабочем пространстве печи.

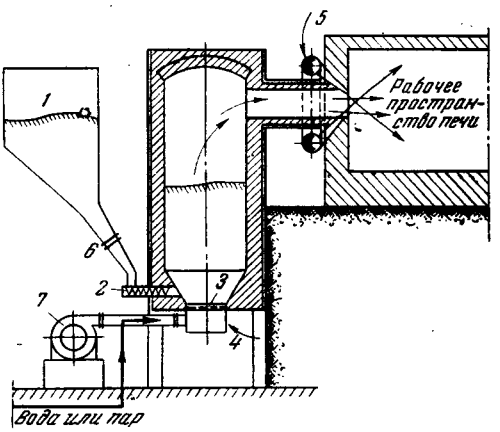


Рис. 3-41. Полугазовая топка с кипящим слоем.

1 — бункер для топлива; *2* — шнековый питатель; *3* — колосниковая решетка; *4* — дутьевая коробка для подачи первичного воздуха; *5* — подача вторичного воздуха; *6* — затвор бункера; *7* — дутьевой вентилятор.

На рис. 3-42 показана полугазовая циклонная топка для бурых углей, имеющая высокие показатели работы благодаря центробежному эффекту закручивания воздушной струи. Частицы мелко дробленного топлива подхватываются вращающейся воздушной струей и подвергаются высокой аэрации, что способствует очень интенсивному образованию полугаза, который и сжигается в печном пространстве.

На рис. 3-43 показана одна из первых в СССР циклонных полугазовых топок для сжигания фрезерного торфа, разработанная в начале тридцатых годов А. А. Щукиным [1]. Топка имеет форму вертикального цилиндра, снабженного сварным стальным кожухом с кирпичной футеровкой. Торфяная крошка вводится посредством питателя вместе с тангенциальным потоком воздуха и газифицируется в закручивающей газовоз-

[1] Бюллетень Всесоюзного теплотехнического института им. Ф. Дзержинского № 13, 14, за 1933 г.

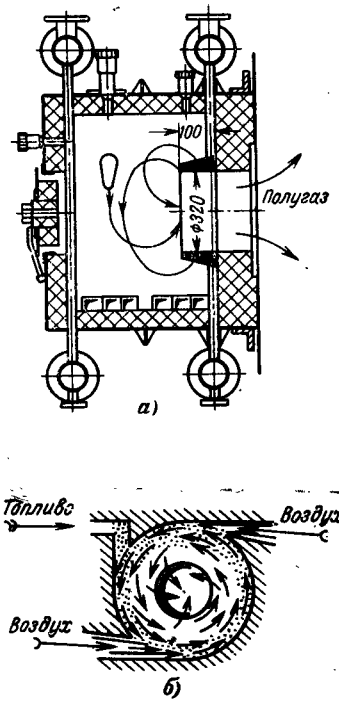


Рис. 3-42. Полугазовая циклонная топка для бурых углей.
а — продольный разрез; *б* — схематичный поперечный разрез.

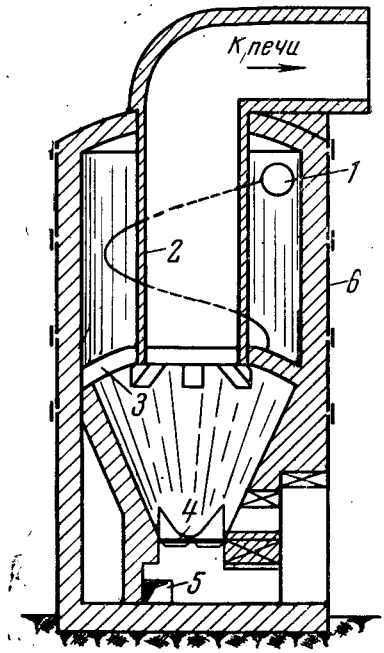


Рис. 3-43. Полугазовая циклонная топка для фрезерного торфа.
1 — ввод воздуха и топлива; *2* — центральная труба; *3* — свод с прозорами для газов; *4* — дожигательная решетка; *5* — подвод воздуха для дожигания; *6* — корпус топки.

душной струе. Крупная крошка выпадает на беспровальную колосниковую решетку, под которой дается воздушное дутье для сжигания топлива. Полугаз отводится по центральной трубе, опирающейся на ажурный свод с проходами для газов, и подается в рабочее пространство печи. Конструкция топки и в наше время может быть использована для сжигания фрезерного торфа, лузги, бурого угля и т. д.

3-7. ОСОБЕННОСТИ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ОТОПЛЕНИЯ ПЕЧЕЙ

Пылеугольное отопление печей обладает преимуществами нефтяного и газового отопления в отношении постоянства физико-химических параметров горения, а также в отношении компактности топочных устройств. Частичка топлива, несущаяся в газовоздушном потоке в раскаленном топочном пространстве, быстро разогревается, и из нее бурно выделяются летучие вещества, сгорающие в объеме. Процесс горения условно разбивается на две стадии: подогрев смеси воздуха и пыли до температуры воспламенения (с одновременным пирогенетическим разложением топлива) и собственно процесс горения летучих, одновременно с которым на поверхности горит и газифицируется кокс (углерод). Скорость прогрева и окисления кокса зависит от удельной поверхности взвешенного топлива, которая очень велика. Так, удельная поверхность угля при размере частиц диаметром $30 \cdot 10^{-3}$ *мм* составляет 50 *м²/кг*, что превышает в 1 000 раз удельную поверхность кускового угля с диаметром 30 *мм*.

Время горения частицы зависит: 1) от тонкости помола (чем меньше размер зерен, тем меньше время сгорания); 2) от качества смесеобразования топлива с воздухом (чем лучше перемешивание, тем больше скорость выгорания); 3) от температуры топочного пространства (чем выше температура, тем устойчивее и интенсивнее протекает процесс); 4) от свойств топлива и в первую очередь от выхода летучих веществ

V^r в процентах на горючую массу [чем больше летучих, тем быстрее сгорает топливо, причем время горения пропорционально отношению $(100—V^r)/100$]; 5) от относительной скорости обдувания w_0, которая меньше скорости потока $w_п$.

Скорость поверхностного реагирования очень мала, так как подача окислителя к горящим частицам идет главным образом за счет диффузии газа. Несмотря на это суммарная скорость (благодаря очень большой удельной поверхности топлива), измеряемая количеством тепла, выделившегося в 1 $м^3$ топочного пространства, составляет величину от 0,16 до 0,25 $Мвт/м^3$ (первая цифра относится к антрацитам, вторая — к бурым углям).

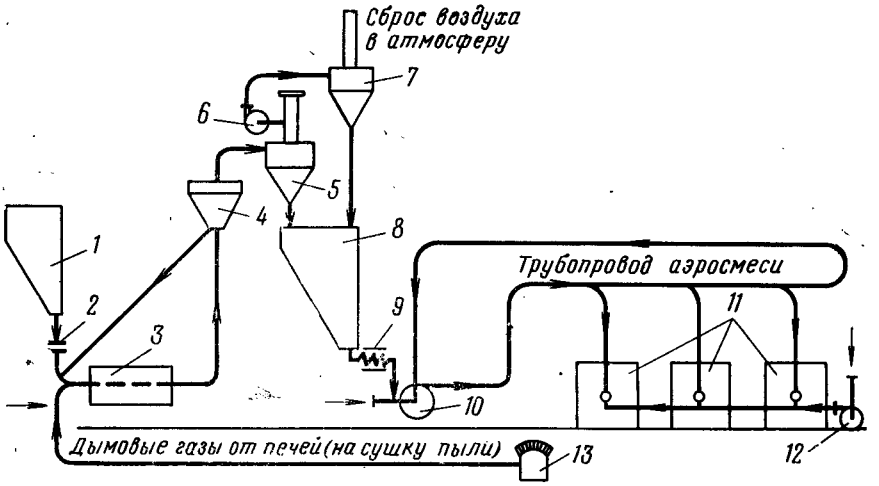


Рис. 3-44. Схема центральной пылеприготовительной установки и подачи угольной пыли к печам.

1 — бункер для дробленого угля; *2* — тарельчатый питатель; *3* — шаровая барабанная мельница; *4* — сепаратор; *5* — циклон; *6* — мельничный вентилятор; *7* — батарейный циклон; *8* — бункер пыли; *9* — шнековый питатель; *10* — циркуляционный вентилятор; *11* — печи; *12* — подача вторичного воздуха; *13* — газоход от печей.

Для уменьшения потери пыли при сбросе воздуха в атмосферу в больших установках устанавливаются дополнительно электрические фильтры или рукавные фильтры.

Крупные печи с большим расходом угля могут работать с индивидуальными пылеприготовительными установками. На предприятиях, где имеется значительное количество сравнительно небольших печей, установленных в различных цехах, сооружают центральные пылеприготовительные станции с раздачей пыли в цеховые бункера. Возможно и промежуточное решение, когда в отдельных цехах, имеющих по нескольку печных агрегатов, устраивается собственное пылеугольное хозяйство.

На рис. 3-44 дана схема центрального пылеприготовления. Уголь сначала подается в мельницу, где превращается в пыль и одновременно сушится при 200—300 °С, а затем направляется в бункер.

При центральной системе пылеприготовления оборудование подбирают таким образом, чтобы оно обеспечивало однодневный запас пыли за 8—16 *ч* работы.

Следует отметить, что в случае использования сырых углей перед размолом требуется их предварительная подсушка, так как иначе углеразмольная установка работает неэффективно. Движение топлива по пылеприготовительному тракту осуществляется посредством пневмотранспорта. Для отделения готовой пыли от воздуха служат циклоны, причем воздух, выбрасываемый из циклона в атмосферу, всегда содержит некоторое количество пыли. В мелких установках отделение воздуха от пыли осуществляется при помощи батарейных циклонов. Потеря пы-

ли при этом составляет 6—12%. В крупных установках для улавливания мелкой пыли, выносимой воздухом из циклонов, устанавливают электрофильтры, снижающие потери пыли до 2—4%.

Исходя из качества отечественных топлив, наши центральные пылеприготовительные установки большей частью оборудуются тихоходными барабанными шаровыми мельницами — надежными агрегатами большой производительности. Эти мельницы рассчитаны на производительность от 1,5 до 16 *т/ч* и более. В некоторых случаях могут быть использованы мельницы и других типов — среднеходные и быстроходные. Для размола твердых углей или углей, содержащих много колчедана (кизеловского, подмосковного, антрацита), эти мельницы непригодны. Принципиально можно производить размол угля и в пневматических мельницах, не имеющих вращающихся частей. Эти мельницы весьма просты в изготовлении, но характеризуются высоким расходом энергии на их привод.

В мелких нагревательных печах можно сжигать угольную пыль с зольностью не более 6%. В крупных печах, обладающих значительными по размерам камерами горения, можно сжигать угольную пыль с повышенной зольностью (до 15—20%). Мартеновские сталеплавильные печи угольной пылью не отапливаются из-за быстрого зашлаковывания регенеративных насадок и из-за вредного влияния серы топлива на качество выплавляемой стали. Опыты показывают, что такие печи могли бы работать на высококачественном каменном угле (с содержанием золы 4,5—6,0%, серы 0,5—0,8%, летучих 25%) при тонкости помола, характеризующейся остатком на сите $R_{70}=5\%$, но на получение такого угля трудно рассчитывать.

Необходимая тонкость помола зависит от свойств топлива (главным образом от содержания летучих), а также от размеров и конструкции камеры сгорания. Как правило, для отопления печей должна применяться угольная пыль более тонкого помола, чем в котельных установках. Можно приблизительно считать, что для кузнецких и донецких газовых углей с содержанием летучих около 30% необходимая тонкость помола характеризуется остатком на сите $R_{70}=6\div10\%$.

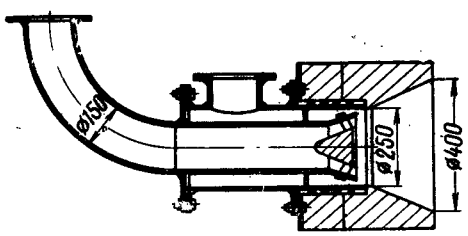


Рис. 3-45. Пылеугольная горелка типа «труба в трубе».

Горелки для сжигания угольной пыли. В печах применяются горелки типа «труба в трубе» (рис. 3-45). В таких горелках с угольной пылью подается 25—35% воздуха (первичный воздух) при общем коэффициенте избытка воздуха $\alpha=1{,}15\div1{,}20$. Скорость пылевоздушной смеси выбирается в зависимости от качества топлива и конструкции печи. При сжигании угольной пыли тонкого помола с большим выходом летучих веществ в печах с большими размерами рабочего пространства (если это пространство используется для сгорания пыли) выбираются скорости истечения пылевоздушной смеси из горелки порядка 20—30 *м/сек*. При угольной пыли более крупного помола с малым выходом летучих эта скорость принимается 10—15 *м/сек*. Во вращающихся печах для обжига цементного клинкера, имеющих большую длину (70—150 *м*), эта скорость доходит до 60—70 *м/сек*. При всех условиях скорость истечения пылевоздушной смеси должна быть выше скорости горения. Скорость аэросмеси в подводящих трубопроводах в 2—4 раза более скорости горения. Во избежание выпадения пыли на горизонтальных участках скорость пылевоздушной смеси до-

водится до 18—25 *м/сек*. В тех случаях, когда невозможно выдержать указанную скорость, например из-за частого отключения некоторой части работающих печей, трубопроводы делаются не тупиковыми, а циркуляционными; при этом избыток аэропыли включается на вентилятор, подающий первичный воздух. Во избежание быстрого износа ротор вентилятора изготовляется из специальной стали.

Размещение горелок в печах соответствует общепринятому расположению форсунок для жидкого топлива. Тепловые напряжения топочного объема печи при применении газовых каменных углей составляют не более 0,3 *Мвт/м*^{3}.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

РАСЧЕТЫ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

4-1. РАСЧЕТ ПОЛНОГО ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

Полное горение топлива является условием наиболее экономичной работы тепловых установок. Условиями полного горения являются: хорошее смесеобразование горючего с окислителем, достаточные температурные условия процесса и надлежащая подготовка топлива к горению.

Расчеты полного горения топлива выполняют как при проектировании, так и при контроле действующих установок. В этих двух случаях методики расчета различны, так как при контроле действующих установок некоторые величины (например, объемный состав продуктов сгорания) берут из показания приборов.

Рассмотрим методику расчета, применяемую при проектировании. Количество воздуха, затрачиваемого на горение топлива, а также объем газов, образующихся в результате горения, обычно измеряют в кубических метрах, приведенных к нормальным условиям (0°С и 760 *мм рт. ст.*). Для полного сгорания топлива требуется некоторый избыток воздуха против теоретического расхода; этот избыток воздуха, характеризуемый коэффициентом избытка воздуха α, зависит от способа сжигания топлива, качества смешения топлива с воздухом и ряда других факторов.

Коэффициент избытка воздуха представляет собой отношение действительно затрачиваемого количества воздуха ($v_в$) к теоретически необходимому его количеству (v^0), т. е.

$$\alpha = \frac{v_в}{v^0}. \qquad (4\text{-}1)$$

При испытаниях печей коэффициент избытка воздуха определяют путем анализа сухих продуктов сгорания, пользуясь формулой

$$\alpha = \frac{1}{1 - 3{,}76\,\dfrac{O_2 - 0{,}5CO - 2CH_4 - 0{,}5H_2}{N_2}}. \qquad (4\text{-}1а)$$

Учитывая, что при полном сгорании топлива $\alpha > 1$, а при газификации топлива $\alpha < 1$, т. е. величина α может быть и больше и меньше единицы, коэффициент избытка называют также коэффициентом расхода воздуха.

Из уравнения (4-1) следует, что действительный расход воздуха определяется выражением

$$v_в = \alpha v^0, \ м^3/кг \text{ или } м^3/м^3, \qquad (4\text{-}2)$$

а избыток воздуха выражением

$$\Delta v_в = v_в - v^0 = (\alpha - 1)\,v^0, \ м^3/кг \text{ или } м^3/м^3. \qquad (4\text{-}3)$$

Расчет горения ведется на 1 *кг* твердого или жидкого топлива или на 1 $м^3$ газообразного топлива. Таким образом, буквенные обозначения с соответствующими индексами выражают количества воздуха или дымовых газов, приходящиеся на 1 *кг* или на 1 $м^3$ сжигаемого топлива.

Продукты полного горения (дымовые газы) представляют смесь сухих газов и водяных паров.

Общее количество дымовых газов $v_г$ складывается из количества сухих газов $v_{с.г}$ и количества водяных паров $v_{в.п}$:

$$v_г = v_{с.г} + v_{в.п},\ м^3/кг \text{ или } м^3/м^3. \qquad (4\text{-}4)$$

Количество сухих дымовых газов представляет собой сумму

$$v_{с.г} = v_{RO_2} + v^0_{N_2} + (\alpha - 1)v^0, \qquad (4\text{-}5)$$

где $v_{RO_2} = v_{CO_2} + v_{SO_2}$ — количество сухих трехатомных газов, $м^3/кг$ или $м^3/м^3$; $v^0_{N_2}$ — минимальное количество азота, поступившего в топку при $\alpha = 1$, $м^3/кг$ или $м^3/м^3$; $\Delta v_в = (\alpha - 1)v^0$ — количество избыточного воздуха, $м^3/кг$ или $м^3/м^3$.

Вывод формул для расчета легко проследить по табл. 4-1, составленной для горения твердого и жидкого топлива, и по табл. 4-2 для горения газообразного топлива. Итоговые формулы следует использовать в качестве рабочих формул. Пример расчета полного горения высокосернистого мазута приведен в гл. 5 (пример 5-1).

Определение калориметрической температуры горения и жаропроизводительности топлива. *Калориметрической* температурой горения называется температура, до которой нагрелись бы образующиеся газы при полном горении топлива, если бы все тепло, введенное в топку, пошло на нагрев этих газов. Калориметрическую температуру горения с минимальным (стехиометрическим) количеством окислителя и без подогрева компонентов сгорания называют *жаропроизводительной способностью* топлива или его *жаропроизводительностью.*

Калориметрическую температуру горения можно найти из теплового баланса (приход тепла равен энтальпии газов), отнесенного к единице количества топлива (1 *кг* или 1 $м^3$):

$$Q^р_н + I_в + I_т = v_г c_г t_к; \qquad (4\text{-}17)$$

здесь $Q^р_н$ — низшая теплота сгорания топлива; $I_в$ — энтальпия воздуха; $I_т$ — энтальпия топлива; $v_г$ — количество продуктов горения; $c_г$ — средняя объемная теплоемкость.

Отсюда калориметрическая температура горения будет:

$$t_к = \frac{Q^р_н + I_в + I_т}{v_г c_г},\ °C, \qquad (4\text{-}18)$$

или в развернутом виде

$$t_к = \frac{Q^р_н + I_в + I_т}{v_{RO_2} c_{CO_2} + v^0_{N_2} c_{N_2} + v_{H_2O} c_{H_2O} + v^0 (\alpha - 1)\, c_в}, \qquad (4\text{-}19)$$

где

$$v_г = v_{RO_2} + v^0_{N_2} + v_{H_2O} + v^0(\alpha - 1) = v^0_г + v^0 \Delta\alpha \qquad (4\text{-}20)$$

— количество продуктов сгорания, получающихся из единицы количества топлива; α — коэффициент избытка воздуха, $\Delta\alpha = \alpha - 1$; $v^0_г$ — теоретическое количество продуктов сгорания при $\alpha = 1$; $t_в$ и $t_т$ — температуры воздуха и топлива, °C.

Таблица 4-1

Вывод формул для расчета показателей горения твердого и жидкого топлива (на 1 *кг* топлива)

Состав топлива		Термохимическая реакция	Расход кислорода, *кмоль*	Теоретический расход воздуха, *м³/кг*	Количество продуктов сгорания, *м³/кг*			
% по массе	*кмоль*				Количество сухих трехатомных газов v_{RO_2}	Теоретическое количество азота $v^0_{N_2}$	Количество избыточного воздуха $\Delta v_в$	Количество водяных паров v_{H_2O}
$C^р$	$\frac{C^р}{100\cdot12}$	$C^р+O_2=RO_2$	$\frac{C^р}{100\cdot12}$	$\frac{22{,}4C^р}{21\cdot12}=0{,}0889\,C^р$	$\frac{22{,}4}{12}\frac{C^р}{100}=1{,}866\frac{C^р}{100}$	79% от расхода воздуха	Количество воздуха, умноженное на величину $(\alpha-1)$	—
$H^р$	$\frac{H^р}{100\cdot2}$	$H_2+\frac{1}{2}O_2=H_2O$	$\frac{H^р}{100\cdot2\cdot2}$	$\frac{22{,}4H^р}{21\cdot2\cdot2}=0{,}265\,H^р$	—	То же	То же	$\frac{22{,}4H^р}{100\cdot2}\approx\frac{9H^р}{100\cdot0{,}804}$
$O^р$	$\frac{O^р}{100\cdot32}$	—	$-\frac{O^р}{100\cdot32}$	$\frac{22{,}4O^р}{21\cdot32}=-0{,}0333\,O^р$	—	То же	То же	—
$N^р$	$\frac{N^р}{100\cdot28}$	—	—	—	—	$\frac{22{,}4N^р}{100\cdot28}=0{,}8\frac{N^р}{100}$	То же	—
$W^р$	$\frac{W^р}{100\cdot18}$	—	—	—	—	—	То же	$\frac{22{,}4W^р}{100\cdot18}=\frac{W^р}{100\cdot0{,}804}$
	$\frac{W_{дут}}{18}$	—	Количество водяных паров, вдуваемых в топку		—	—	То же	$\frac{22{,}4W_{дут}}{18}=\frac{W_{дут}}{0{,}804}$
			Количество водяных паров, поступающих в топку с воздухом при его влагосодержании $d_в$, *г/м³* сухого воздуха		—	—	—	$\frac{22{,}4\cdot d_в v^0\alpha}{100\cdot18}\approx 0{,}016v^0\alpha$
Рабочие формулы			После сложения в вертикальных колонках имеем: $v^0=0{,}0889\,C^р+0{,}265H^р-0{,}0333\,O^р$ (4-6)		$v_{RO_2}=1{,}866\frac{C^р}{100}$ (4-7)	$v^0_{N_2}=0{,}79v^0+0{,}8\frac{N^р}{100}$ (4-8)	$\Delta v_в=(\alpha-1)v^0$ (4-9)	$v_{H_2O}=\frac{9H^р+W^р+100W_{дут}}{100\cdot0{,}804}+0{,}016v^0\alpha$ (4-10)

Жаропроизводительность топлива будет:

$$t_ж=\frac{Q^р_и}{v^0_г c_г}=\left(\frac{Q^р_и}{v^0_г}\right)\frac{1}{c_г},\ °C. \qquad (4\text{-}21)$$

Жаропроизводительность топлива — очень важное физическое понятие, так как она позволяет оценить, насколько эффективно можно использовать данное топливо для высокотемпературного процесса. Неправильно думать, что чем больше теплота сгорания топлива, тем выше его жаропроизводительность, т. е. тем более высокую температуру можно достичь в печи.

В рассмотренном нами примере мы видим, что жаропроизводительность окиси углерода при низшей теплоте сгорания сухого газа $Q^с_и=12{,}65$ *Мдж/м³*

Таблица 4-2

Вывод формул для расчета показателей полного горения газообразного топлива (на 1 м³ сухого топлива)

Состав топлива, % по объему	Термохимические реакции	Расход кислорода, м³/м³	Теоретический расход воздуха, м³/м³	Количество продуктов сгорания, м³/м³			
				Объем сухих трехатомных газов v_{RO_2}	Теоретический расход азота v_{N_2}	Объем избыточного воздуха $\Delta v_в$	Объем водяных паров v_{H_2O}
CO	$CO+\frac{1}{2}O_2=CO_2$	$\frac{0{,}5CO}{100}$	$\frac{100}{21}\cdot 0{,}5\frac{CO}{100}=$ $=0{,}0476\cdot 0{,}5CO$	$\frac{CO}{100}$	79% от расхода воздуха	Количество воздуха, умноженное на величину $(\alpha-1)$	—
H_2	$H_2+\frac{1}{2}O_2=H_2O$	$\frac{0{,}5H_2}{100}$	$0{,}0476\cdot 0{,}5H_2$	—	То же	То же	$\frac{H_2}{100}$
CH_4	$CH_4+2O_2=$ $=CO_2+2H_2O$	$\frac{2CH_4}{100}$	$0{,}0476\cdot 2CH_4$	$\frac{CH_4}{100}$	То же	То же	$\frac{2CH_4}{100}$
C_mH_n	C_mH_n+ $+\left(m+\frac{n}{4}\right)O_2=$ $=mCO_2+\frac{n}{2}H_2O$	$\frac{\left(m+\frac{n}{4}\right)C_mH_n}{100}$	$0{,}0476\left(m+\frac{n}{4}\right)C_mH_n$	$\frac{mC_mH_n}{100}$	То же	То же	$\frac{n}{2}\frac{C_mH_n}{100}$
H_2S	$H_2S+1{,}5O_2=$ $=SO_2+H_2O$	$\frac{1{,}5H_2S}{100}$	$0{,}0476\cdot 1{,}5H_2S$	$\frac{H_2S}{100}$	То же	То же	$\frac{H_2S}{100}$

Продолжение табл. 4-2

Состав топлива, % по объему	Термохимические реакции	Расход кислорода, $м^3/м^3$	Теоретический расход воздуха, $м^3/м^3$	Количество продуктов сгорания, $м^3/м^3$			
				Объем сухих трехатомных газов v_{RO_2}	Теоретический расход азота v_{N_2}	Объем избыточного воздуха, $\Delta v_в$	Объем водяных паров v_{H_2O}
O_2	—	$-\frac{O_2}{100}$	$-0{,}0476O_2$	—	—	—	—
CO_2	—	—	—	$\frac{CO_2}{100}$	—	—	—
N_2	—	—	—	—	$\frac{N_2}{100}$	—	—
	Колнчество водяных паров, поступающих с газом при влагосодержании $d_г$, $г/м^3$ сухого газа			—	—	—	$\frac{d_г}{1\,000 \cdot 0{,}804} \approx 0{,}124 d_г$
	Количество водяных паров, поступающих с воздухом при влагосодержании $d_в$, $г/м^3$ сухого воздуха			—	—	—	$\frac{d_в v^0 \alpha}{100 \cdot 0{,}804} \approx 0{,}016 v^0 \alpha$

После сложения в вертикальных колонках имеем:

Рабочие формулы

$$v^0_{O_2} = 0{,}01\left[0{,}5CO + 0{,}5H_2 + 2CH_4 + \Sigma\left(m + \frac{n}{4}\right) C_mH_n + 1{,}5H_2S - O_2\right] \quad (4\text{-}11)$$

$$v^0 = 0{,}0476\left[0{,}5CO + 0{,}5H_2 + 2CH_4 + \Sigma\left(m + \frac{n}{4}\right) C_mH_n + 1{,}5H_2S - O_2\right] \quad (4\text{-}12)$$

$$v_{RO_2} = 0{,}01 \left[CO + CH_4 + \Sigma m\, C_mH_n + H_2S + CO_2\right] \quad (4\text{-}13)$$

$$v^0_{N_2} = 0{,}79 v^0 + \frac{N_2}{100} \quad (4\text{-}14)$$

$$\Delta v_в = (\alpha - 1) v^0 \quad (4\text{-}15)$$

$$v_{H_2O} = 0{,}01\left[H_2 + 2CH_4 + \Sigma \frac{n}{2} C_mH_n + H_2S + 0{,}124 d_г\right] + 0{,}016 v^0 \alpha \quad (4\text{-}16)$$

составляет $t_ж$=2 500 °С, а жаропроизводительность природного газа при $Q_н^c$= =35,65 *Мдж/м*³ будет $t_ж$=2 040 °С, т. е. гораздо ниже, чем у окиси углерода. Как видно из формулы (4-21), $t_ж$ тем больше, чем больше количество тепла, приходящееся на 1 *м*³ нагреваемых газов, $Q_н^p/v_г^0$, значение которого следующее: для доменного газа 2 520; для генераторного газа 3 140; для городского (московского) газа 4 360 и для окиси углерода 4 610 *кдж/м*³.

Пример 4-1. Определить жаропроизводительность окиси углерода CO, если ее теплота сгорания $Q_н^c$ = 12,65 *Мдж/м*³. Теоретический расход воздуха по формуле (4-12)

$$v^0 = 0{,}0476 \cdot 0{,}5 \cdot CO = 0{,}0476 \cdot 0{,}5 \cdot 100 = 2{,}38 \ м^3/м^3.$$

Количество продуктов горения (без учета влаги воздуха) по формулам (4-13) и (4-14)

$$v_г^0 = v_{CO_2} + v_{N_2}^0 = 0{,}01 \cdot 100 + 0{,}79 \cdot 2{,}38 = 1{,}0 + 1{,}89 = 2{,}89 \ м^3/м^3.$$

Из таблицы, задаваясь предварительно $t_ж$=2 400 °С, находим средние теплоемкости:

$$c_{CO_2} = 2{,}47 \ кдж/(м^3 \cdot град) \text{ и } c_{N_2} = 1{,}51 \ кдж/(м^3 \cdot град);$$

$$t_ж = \frac{12{,}65 \cdot 10^3}{1 \cdot 2{,}47 + 1{,}89 \cdot 1{,}51} = 2\,500 \ °C.$$

Сравнение эффективности достижения высоких температур при сжигании топлива с кислородом или с горячим воздухом. Для достижения высоких температур горения топлива помимо подогрева воздуха применяется также обогащение воздуха кислородом. Так, в доменных печах воздух обогащают кислородом с 21% (естественное среднее содержание кислорода в атмосфере) до 30—35%. Кислород подают также в шахтные печи цветной металлургии, в нагревательные печи безокислительного нагрева и т. д. Можно достичь одной и той же калориметрической (а следовательно, и действительной) температуры горения двумя способами: во-первых, путем высокотемпературного подогрева воздуха, идущего на сгорание топлива в воздухоподогревателях рекуперативного или регенеративного типа, во-вторых, путем обогащения воздуха кислородом с концентрацией 96%, поступающим от кислородной установки (более высокая концентрация в данном случае не требуется). Экономически выгоднее применять высокотемпературный нагрев воздуха в воздухоподогревателях современного типа с нагревом воздуха до 700—1 000 °С. Особенно целесообразны воздухоподогреватели с автономным обогревом природным или другим газом.

При обогащении воздуха кислородом повышение температуры горения достигается путем уменьшения количества продуктов горения за счет уменьшения содержания азота N_2. Если обозначить буквой z содержание кислорода в воздухе (%), то дополнительный расход кислорода, поступающего с кислородной установки, отнесенный к единице количества топлива, будет:

$$v_{O_2}^{доб} = \frac{21}{79} \frac{z - 21}{z} v^0 \alpha', \qquad (4\text{-}22)$$

где v^0 — теоретический расход воздуха на горение единицы топлива; α — коэффициент избытка воздуха (или более широко — коэффициент расхода окислителя).

Количество азота при сжигании единицы количества топлива на обогащенном воздухе будет:

при жидком и твердом топливе

$$v'_{N_2} = \frac{21}{z}\left(1 - \frac{z}{100}\right) v^0 \alpha' + 0{,}8 \frac{N^p}{100}; \qquad (4\text{-}23)$$

при газообразном топливе

$$v'_{N_2}=\frac{21}{z}\left(1-\frac{z}{100}\right)v^0\alpha'+\frac{N_{2т}}{100}; \qquad (4\text{-}24)$$

здесь $N^р$ — содержание азота в рабочей массе топлива; $N_{2т}$ — то же в газообразном топливе, % по объему.

В остальном расчет не отличается от обычного расчета горения топлива. Для первого случая теоретический тепловой баланс топки (пренебрегая азотом топлива) напишется следующим образом:

$$\left\{v_{RO_2}c_{CO_2}+v^0\left[0{,}79+(\alpha-1)\right]c_{R_2}+v_{H_2O}c_{H_2O}\right\}t_к=Q^р_н+I, \qquad (4\text{-}25)$$

где I — энтальпия горячего воздуха; c_{R_2} — средняя теплоемкость двухатомных газов.

Для второго случая—при сжигании на обогащенном воздухе

$$\left\{v_{RO_2}c_{CO_2}+v^0\left[\frac{21}{z}\left(1-\frac{z}{100}\right)+\frac{21}{z}(\alpha'-1)\right]c_{R_2}+v_{H_2O}c_{H_2O}\right\}t_к=Q^р_н. \qquad (4\text{-}26)$$

Полагая калориметрические температуры горения одинаковыми и равными $t_к$ °С, вычитаем из уравнения (4-25) уравнение (4-26):

$$v^0\left\{[0{,}79+(\alpha-1)]-\left[\frac{21}{z}\left(1-\frac{z}{100}\right)+\frac{21}{z}(\alpha'-1)\right]\right\}c_{R_2}t_к=v^0\alpha c_в t_в. \qquad (4\text{-}27)$$

Из этого уравнения определим температуру воздуха $t_в$, до которой необходимо нагреть его, чтобы получить ту же калориметрическую температуру горения, что будет иметь место при сжигании топлива на обогащенном воздухе с концентрацией кислорода z %:

$$t_в=\frac{z-21}{z}\,\frac{c_{R_2}\alpha'}{c_в\alpha}\,t_к. \qquad (4\text{-}28)$$

Легко определить, что температура подогрева воздуха 800 °С будет соответствовать концентрации кислорода в обогащенном воздухе примерно 30%.

Диаграмма *It* полного горения топлива и примеры ее использования. При проектировании промышленных печей, рекуператоров, регенераторов и котлов-утилизаторов приходится выполнять много расчетов, в частности делать подробные расчеты горения для различных избытков воздуха, вычислять калориметрические температуры горения при различных подогревах воздуха и топлива и т. п. Эти расчеты значительно упрощаются при пользовании диаграммами горения для типичных топлив. В отдельных случаях, когда заданный состав топлива сильно отличается от типичного, приходится делать вычисления и строить соответствующую диаграмму *It*, но при этом труд, затраченный на построение диаграммы, вполне компенсируется упрощением дальнейших расчетов.

На рис. 4-1 показана диаграмма *It* горения для природного газа. По оси ординат отложены значения энтальпии дымовых газов, отнесенные к единице количества топлива (в нашем случае *Мдж/м*³), а по оси абсцисс — температура газов. На диаграмме нанесено семейство кривых $I=f(t_г)$ для различных избытков воздуха при полном горении топлива. Кроме того, даны кривые для калориметрических температур горения при различных коэффициентах избытка воздуха $t_к=f(t_в, \alpha)$,

а для газообразных топлив также в зависимости от одновременного подогрева воздуха и газа $t_к = f(t_в, t_т, \alpha)$.

Помимо указаиных кривых на диаграмме часто приводятся данные о расходе воздуха, необходимого для полного сгорания единицы количества топлива $v_в = f(\alpha)$, о количествах продуктов горения, получаемых

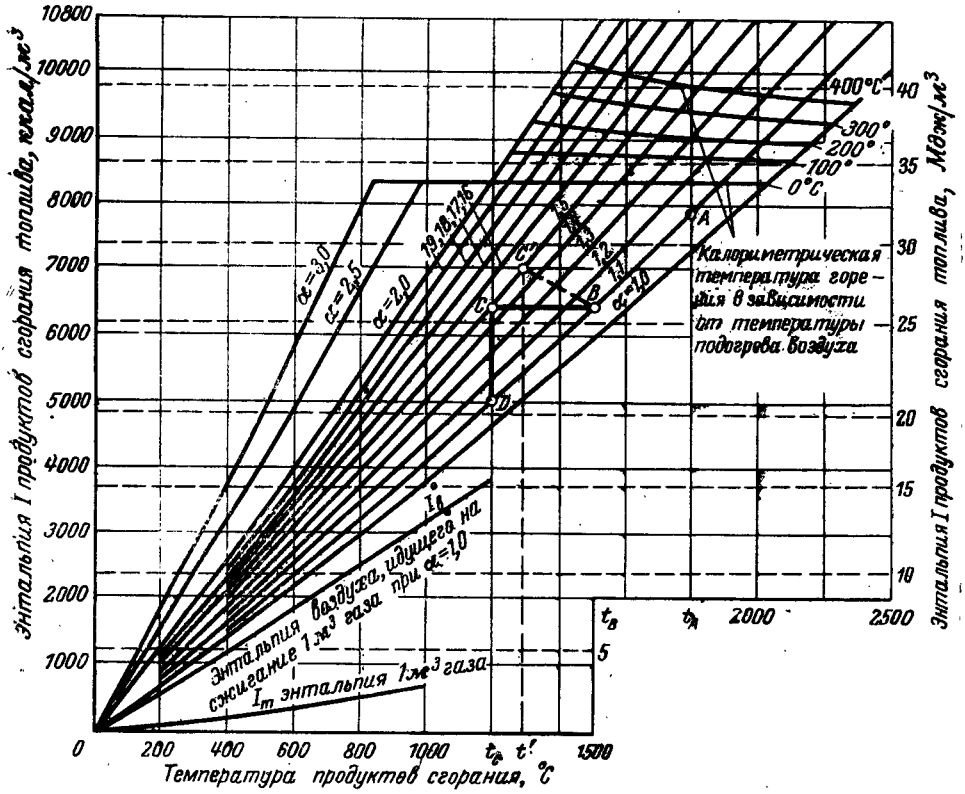


Рис. 4-1. *It*-диаграмма горения прнродного газа с $Q_н^c = 35{,}60$ *Мдж/м³* (8 500 *ккал/м³*)

Пример. Линия *AB* — охлаждение газов при α=1,1 с 1 800 °С до 1 500 °С; линия *BC* — охлаждение газов за счет присоса воздуха с α=1,1 до α=1,5; линия *DC* — газотермический процесс.

при сгорании единицы количества топлива $v_г = f(\alpha)$, а также о содержании CO_2 и O_2 при различных избытках воздуха в сухих дымовых газах и о содержании H_2O во влажных дымовых газах.

4-2. РАСЧЕТ НЕПОЛНОГО ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

Неполное горение топлива имеет место: при диссоциации двуокиси углерода CO_2 и водяного пара H_2O в условиях высоких температур (более 1 500 °С); при недостатке окислителя (воздуха) и при недостаточном смесеобразовании в условиях обычных температур. Неполное горение вызывает потерю тепла от химического недожога топлива и понижение вследствие этого температуры горения.

Иногда неполное горение организуется специально: с целью *реформации (самокарбюрации)* природного газа для разложения углеводородов с выделением сажистого (дисперсного) углерода и последующего сжигания в светящемся факеле; с целью получения защитной атмосферы в печах для безокислительного нагрева металла с последующим дожиганием газов в особых камерах дожигания. В этих двух случаях имеют дело с двухступенчатым горением природного газа.

Твердое топливо сжигается с коэффициентом расхода воздуха $\alpha<1$ с целью газификации его в газогенераторах или полугазовых топках. Жидкое топливо — мазут иногда газифицируется перед сжиганием в газификаторах (предтопках циклонного или другого типа). Неполное горение природного газа и жидкого топлива осуществляется также в технологических устаиовках для получения сажи и в других случаях.

Расчет неполного горения топлива с образованием окиси углерода CO. На практике неполное горение имеет место в шахтных печах, работающих на коксе. Примером может служить чугунолитейная вагранка, где имеет место неполное горение кокса. Доля углерода кокса в количестве $y_н$ сгорает в окись углерода CO, другая часть в количестве $1-y_н$ в двуокись углерода CO_2. Величину $y_н$ легко вычислить, зная содержание окиси углерода CO % и общее количество газов:

$$y_н = \frac{126 CO v_{с.г}}{235 C^р}. \qquad (4\text{-}29)$$

Расчетные формулы при неполном горении углерода при $\alpha<1$ имеют следующий вид:

расход воздуха на сгорание 1 *кг* кокса

$$v_в = 0{,}0889[(1-y_н)C^р + 0{,}375S^р_л] + 0{,}0445 y_н C^р + 0{,}265H^р - 0{,}033O^р, \ м^3/кг. \qquad (4\text{-}30)$$

Количество сухих трехатомных газов

$$v_{RO_2} = 0{,}0187[(1-y_н)C^р + 0{,}375S^р_л], \ м^3/кг. \qquad (4\text{-}31)$$

Количество окиси углерода

$$v_{CO} = 0{,}0187 y_н C^р, \ м^3/кг. \qquad (4\text{-}32)$$

Количество азота

$$v_{N_2} = 0{,}79 v_в + 0{,}8 \frac{N^р}{100}, \ м^3/кг. \qquad (4\text{-}33)$$

Количество водяных паров

$$v_{H_2O} = 0{,}111 H^р + 0{,}0124 W^р + 0{,}0161 v_в, \ м^3/кг. \qquad (4\text{-}34)$$

Коэффициент расхода воздуха определяется из уравнения

$$CO = 69{,}4(1-\alpha). \qquad (4\text{-}35)$$

Пример 4-2. Произвести расчет горения кокса в вагранке при $y_н = 0{,}28$ следующего состава: $C^р = 81{,}5\%$,

$$H^р = 0{,}4\ \%,\ S^р_л = 1\ \%,\ N^р = 1{,}2\ \%,\ O^р = 0{,}9\%,\ W^р = 1\ \%.$$

Расход воздуха по формуле (4-30)

$$v_в = 0{,}0889(0{,}72 \cdot 81{,}5 + 0{,}375 \cdot 1) + 0{,}0445 \cdot 0{,}28 \cdot 81{,}5 + 0{,}265 \cdot 0{,}4 - 0{,}033 \cdot 0{,}9 = 6{,}34 \ м^3/кг.$$

Количество сухих трехатомных газов по формуле (4-31)

$$v_{RO_2} = 0{,}0187(0{,}72 \cdot 81{,}5 + 0{,}0375 \cdot 1) = 1{,}1 \ м^3/кг.$$

Количество окиси углерода по формуле (4-32)

$$v_{CO} = 0{,}0187 \cdot 0{,}28 \cdot 81{,}5 = 0{,}427 \ м^3/кг.$$

Количество азота по формуле (4-33)

$$v_{N_2} = 0{,}79 \cdot 6{,}34 + 0{,}8 \cdot \frac{1{,}2}{100} = 5{,}03 \ м^3/кг.$$

Количество водяных паров по формуле (4-34)

$$v_{H_2O} = 0{,}111 \cdot 0{,}4 + 0{,}0124 \cdot 1 + 0{,}0161 \cdot 6{,}34 = 0{,}198 \ м^3/кг.$$

Общее количество газов

$$v_г = 1{,}1 + 0{,}427 + 5{,}03 + 0{,}198 = 6{,}755 \ м^3/кг.$$

Состав продуктов горения будет:

$$RO_2 = \frac{v_{RO_2}}{v_г} \cdot 100 = \frac{1,1 \cdot 100}{6,755} = 15,6\%;\ CO = \frac{0,427 \cdot 100}{6,755} = 6,3\ \%;$$

$$N_2 = 75,12\ \%;\ H_2O = 2,92\ \%;\ \Sigma = 100\%.$$

Расчет неполного горения вследствие диссоциации газов. При горении газов имеет место диссоциация молекул двуокиси углерода и водяного пара, сопровождающаяся отрицательным тепловым эффектом:

$$CO_2 \longrightarrow CO + 0,5\,O_2 - 286\ \textit{Мдж/кмоль};\qquad (4\text{-}36)$$

$$H_2O\ \text{пар} \longrightarrow H_2 + 0,5\,O_2 - 243\ \textit{Мдж/кмоль}.\qquad (4\text{-}37)$$

Разложение водяного пара возможно и с образованием гидроокиси по реакции

$$H_2O \rightleftarrows 0,5\,H_2 + OH.\qquad (4\text{-}38)$$

Диссоциация молекул продуктов сгорания не сказывается до температур порядка 1 500 °С и можно считать, что реакции горения на этом участке температур идут до конца. Однако при более высоких температурах в рабочем пространстве наблюдается диссоциация. Например, при парциальном давлении двуокиси углерода $p_{CO_2} = 0,12$ *бар* при температуре 1 500 °С степень диссоциации CO_2 составляет 0,5%, но при 2 000 °С она возрастает до 11,8%, а при 3 000 °С достигнет 91,7%. Для водяного пара H_2O при $p_{H_2O} = 0,10$ *бар* при 1 600 °С степень диссоциации 0,6%; при 2 000 °С — 4,3% и при 3 000 °С — 61,6%. Степень диссоциации увеличивается при уменьшении давления. В мартеновских печах факел имеет температуру около 1 800—2 000 °С, и поэтому следует считаться с потерями тепла от диссоциации газов. Важно уметь определить равновесный состав продуктов сгорания при заданной температуре, а по их составу — потери тепла от диссоциации.

Для определения состава газа следует написать уравнения констант химического равновесия и добавить к ним уравнения материальных балансов для элементов, входящих в состав газа. При температурах до 2 000 °С можно ограничиться только учетом диссоциации двуокиси углерода и водяного пара по реакциям (4-36) и(4-37). При более высоких температурах (выше 2 200 °С) происходит более глубокая диссоциация и кроме реакций (4-36), (4-37)) и (4-38) имеет место разложение молекул водорода и кислорода на атомы:

$$\left.\begin{aligned} H_2 &\rightleftarrows 2H; \\ O_2 &\rightleftarrows 2O. \end{aligned}\right\}\qquad (4\text{-}39)$$

Азот при обычных температурах, имеющих место в печах, можно рассматривать как инертный газ, но при 2 000 °С начинается образование закиси азота — ядовитой составляющей продуктов горения:

$$0,5\,N_2 + 0,5\,O_2 \rightleftarrows NO.\qquad (4\text{-}40)$$

Поскольку эта реакция эндотермическая, содержание NO с ростом температуры увеличивается. Состав газов в этом случае:

$$CO_2 + H_2O + CO + H_2 + OH + H + O + O_2 + N_2 + NO = 100\%.$$

Значения коэффициента диссоциации δ (т. е. отношения количества разложившегося газа к начальному его количеству) приведены в табл. 4-3.

Как видно из приведенных выше формул, при диссоциации увеличивается количество продуктов сгорания: 0,5 *кмоль* кислорода на 1 *кмоль* разложившихся CO_2 и H_2O. Это позволяет рассчитать величи-

Таблица 4-3

Коэффициенты диссоциации CO_2 (над чертой) и H_2O (под чертой)

Парциальное давление в долях атмосферного	Температура, °С							
	1 600	1 800	2 000	2 200	2 400	2 600	2 800	3 000
0,03	0,022 / 0,009	0,069 / 0,027	0,180 / 0,063	0,376 / 0,134	0,590 / 0,244	0,777 / 0,397	0,896 / 0,576	0,956 / 0,729
0,05	0,019 / 0,008	0,059 / 0,023	0,154 / 0,054	0,331 / 0,115	0,537 / 0,210	0,733 / 0,352	0,872 / 0,522	0,944 / 0,685
0,07	0,017 / 0,007	0,052 / 0,020	0,139 / 0,048	0,303 / 0,103	0,502 / 0,191	0,702 / 0,321	0,852 / 0,487	0,935 / 0,651
0,08	0,016 / 0,006	0,050 / 0,190	0,134 / 0,046	0,292 / 0,099	0,488 / 0,184	0,689 / 0,310	0,844 / 0,473	0,931 / 0,638
0,09	0,016 / 0,006	0,048 / 0,018	0,129 / 0,045	0,283 / 0,096	0,476 / 0,177	0,678 / 0,301	0,837 / 0,461	0,927 / 0,626
0,1	0,015 / 0,006	0,046 / 0,018	0,125 / 0,043	0,275 / 0,093	0,465 / 0,172	0,667 / 0,292	0,830 / 0,450	0,923 / 0,616
0,12	0,015 / 0,006	0,044 / 0,017	0,118 / 0,040	0,261 / 0,088	0,446 / 0,163	0,649 / 0,278	0,817 / 0,432	0,917 / 0,596
0,14	0,014 / 0,006	0,042 / 0,016	0,112 / 0,038	0,250 / 0,084	0,431 / 0,156	0,634 / 0,267	0,806 / 0,416	0,911 / 0,580
0,16	0,014 / 0,005	0,040 / 0,015	0,108 / 0,036	0,241 / 0,080	0,418 / 0,150	0,620 / 0,257	0,796 / 0,404	0,906 / 0,566
0,18	0,013 / 0,005	0,038 / 0,015	0,104 / 0,035	0,233 / 0,077	0,406 / 0,144	0,608 / 0,248	0,787 / 0,393	0,901 / 0,554
0,2	0,013 / 0,005	0,037 / 0,014	0,100 / 0,034	0,226 / 0,074	0,396 / 0,139	0,597 / 0,241	0,779 / 0,383	0,896 / 0,543
0,25	0,012 / 0,005	0,035 / 0,013	0,094 / 0,032	0,212 / 0,069	0,375 / 0,130	0,574 / 0,226	0,762 / 0,362	0,885 / 0,519
0,3	0,011 / 0,005	0,033 / 0,013	0,088 / 0,030	0,201 / 0,065	0,358 / 0,122	0,555 / 0,215	0,745 / 0,346	0,876 / 0,500
0,5	0,009 / 0,004	0,028 / 0,011	0,074 / 0,025	0,173 / 0,054	0,314 / 0,104	0,501 / 0,185	0,699 / 0,302	0,847 / 0,447
1,0	0,007 / 0,003	0,022 / 0,008	0,060 / 0,020	0,140 / 0,044	0,260 / 0,084	0,430 / 0,150	0,630 / 0,250	0,800 / 0,380

ну, на которую увеличивается первоначальное количество продуктов сгорания:

$$v_{\text{дисс}} = 0{,}5\,(\delta_{CO_2} CO_2 + \delta_{H_2O} H_2O), \qquad (4\text{-}41)$$

где первое слагаемое — количество появившегося в результате диссоциации CO, а второе — количество появившегося H_2. Коэффициент перед скобками переводит эту сумму в количество свободного кислорода. Сумма количеств CO_2+CO и H_2O+H_2 после диссоциации равна первоначальной сумме CO_2+H_2O.

Диссоциация — эндотермический процесс. Это следует учитывать в тепловом балансе топочного пространства с помощью формул (4-36) и (4-37).

Диссоциация вызывает потерю тепла от химического недожога только в рабочей камере печи; горючие газы при дальнейшем их движении догорают, и их тепло может быть использовано. Так, например, газы, покидающие плавильное пространство мартеновской печи, догорают в шлаковиках и регенераторах, и в целом для печи потеря от диссоциации почти не имеет места.

Теоретическая температура горения. Явление диссоциации связано с понижением температуры горения, обусловленным отрицательным тепловым эффектом соответствующих реакций. В связи с этим наряду с калориметрической температурой горения в расчетах пользуются понятием *теоретической температуры горения,* под которой имеется в виду температура, до которой нагрелись бы образующиеся газы при горении топлива, сопровождающемся диссоциацией, если бы все тепло, введенное в топку, пошло на нагрев этих газов. Из этого определения видно, что она меньше калориметрической температуры горения и может быть определена из следующего уравнения теплового баланса:

$$Q_{\text{н}}^{\text{р}}\eta' = Q_{\text{н}}^{\text{р}}\left(\frac{100 - q_{\text{дисс}}}{100} + \frac{I_{\text{в}} + I_{\text{т}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}\right) = v_{\text{т}} c_{\text{т}} t_{\text{т}}; \qquad (4\text{-}42)$$

здесь $q_{\text{дисс}}$ — потери от химического недожога из-за диссоциации газов, %; $I_{\text{в}}$ и $I_{\text{т}}$ — энтальпии воздуха и топлива; η' — коэффициент тепловыделения, определяемый по формуле

$$\eta' = \frac{100 - q_{\text{дисс}}}{100} + \frac{I_{\text{в}} + I_{\text{т}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}. \qquad (4\text{-}43)$$

Отсюда имеем:

$$t_{\text{т}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}}\eta'}{v_{\text{т}} c_{\text{т}}}, \ ^{\circ}\text{C}. \qquad (4\text{-}44)$$

Расчет неполного горения газообразного топлива при коэффициенте расхода воздуха $\alpha<1$. Состав продуктов неполного горения при заданном коэффициенте расхода воздуха α зависит не только от природы газообразного топлива, но также и от организации горения и от смесеобразования. В первом случае сжигают часть газа при помощи вспомогательных горелок с последующим смешением газа с раскаленными продуктами сгорания. При этом имеют место термическое разложение углеводородов и другие реакции. Так, например, устраивают самокарбюрацию природного газа. Таким же образом идет процесс горения при подаче газа и воздуха раздельными струями. Во втором случае сжигают газ, тщательно перемешанный с воздухом (чаще всего подогретым) в особых горелках. Угловодороды имеют особенность присоединять к себе в процессе крекинга кислород воздуха в форме газообразных соединений — окиси углерода; в этом случае получается мало сажистого углерода. Таким образом сжигают природный газ в печах с безокислительной атмосферой.

Реформация газа с выделением сажистого углерода. При расчете неполного горения газа принимается, что за счет кислорода воздуха, подаваемого к горелкам, полностью сгорает часть газа, пропорциональная величине коэффициента расхода воздуха α. Несгоревшие углеводороды подвергаются термическому разложению с выделением сажистого (дисперсного) углерода по реакциям

$$C_mH_n \rightarrow \frac{n}{2} H_2 + mC_т, \tag{4-45}$$

в частности, для метана

$$CH_4 \longrightarrow 2H_2 + C_т. \tag{4-46}$$

Степень разложения углеводородов ψ зависит от температуры: для метана CH_4 при 800 °С $\psi = 0{,}08$, а при 1 300 °С $\psi = 0{,}97$; для этилена C_2H_4 можно считать, что при 900 °С процесс разложения является полным. Количество сажистого углерода при полном разложении метана составляет 268 *г/м*³, этилена C_2H_4 553 *г/м*³ и т. д. Поскольку сгорание газа в печах чаще всего идет при относительно высоких температурах, мы будем считать в расчете, что несгоревшие высокомолекулярные углеводороды C_mH_n разлагаются полностью.

Присутствие в газе значительного количества взвешенного углерода $C_т$ вызывает совместное протекание реакций

$$CO_2 + C \rightleftarrows 2CO \mp 162{,}5 \ Мдж/кмоль; \tag{4-47}$$

$$CO_2 + H_2 \rightleftarrows CO + H_2O \mp 43{,}7 \ Мдж/кмоль. \tag{4-48}$$

Кинетика этих реакций определяется температурой, и поэтому при расчете задаются температурой топочной камеры с последующей ее проверкой. Обозначим через x — количество CO_2, прореагировавшего с соответствующим количеством углерода до 2CO по реакции (4-47); через y — количество метана CH_4, распавшегося на $2H_2$ и C по реакции (4-46). Для определения неизвестных x и y напишем константы равновесия реакций (4-46) и (4-48):

$$\left.\begin{aligned} K_C^{IV} &= \frac{CH_4}{H_2^2} = \frac{v_{CH_4}}{v_{H_2}^2}; \\ K_C^{V} &= \frac{CO_2 \cdot H_2}{CO \cdot H_2O} = \frac{v_{CO_2} v_{H_2}}{v_{CO} v_{H_2O}}. \end{aligned}\right\} \tag{4-49}$$

Подставляя в последние два уравнения заранее вычисленные по известным формулам объемы газов и беря значения констант равновесия из таблицы [Л. 1], определяем x и y и далее искомые количества компонентов неполного сгорания.

Количество их будет:

$$v_г = v_{RO_2} + v_{CO} + v_{H_2O} + v_{CH_4} + v_{H_2} + v_{N_2}, \ м^3/м^3. \tag{4-50}$$

Состав газов в объемных процентах:

$$RO_2 + CO + H_2O + CH_4 + H_2 + N_2 = 100\%. \tag{4-51}$$

Количество сажистого углерода в граммах на 1 *м*³ газообразного топлива находится на основании реакции (4-45); находим число киломолей углерода m_c на 1 *м*³ газообразного топлива и умножаем его на массу 1 киломоля, равную 12,01 *кг*.

Реформация газа без сажеобразования. Этот случай имеет место при использовании природного газа в печах для безокислительного нагрева металла. Он характеризуется хорошей подготовкой смеси газа и воздуха в специальных горелках (в том числе акустических) и высокой

температурой процесса (1 200—1 400 °С). В этих условиях согласно рекомендации В. Ф. Копытова принимаются допущения о том, что в продуктах сгорания отсутствует сажистый углерода, а также метан.

Расчет ведем для простоты на 100 $м^3$ газа.

Общее количество продуктов горения будет:

$$V_г = V_{CO_2} + V_{CO} + V_{H_2O} + V_{H_2} + V_{N_2},\ м^3. \qquad (4\text{-}52)$$

Расход воздуха определяем по формуле (4-12), а количество азота V_{N_2} по формуле (4-14).

Таким образом, остаются четыре неизвестных, которые обозначим ($м^3$):

$$V_{CO_2} = x;\quad V_{CO} = y;\quad V_{H_2O} = z;\quad V_{H_2} = u.$$

Для их определения составим три уравнения материальных балансов, в левой части которых — количество данного элемента в продуктах горения, а в правой части — в исходном газообразном топливе.

Баланс углерода

$$x + y = CO_2 + CH_4 + 2C_2H_6 + 3C_3H_8,\ м^3. \qquad (4\text{-}53)$$

Баланс водорода

$$2z + 2u = 4CH_4 + 6C_2H_6 + 8C_3H_8,\ м^3. \qquad (4\text{-}54)$$

Баланс кислорода

$$2x + y + z = 2CO_2 + 2 \cdot 0{,}21 V_в,\ м^3; \qquad (4\text{-}55)$$

здесь $0{,}21\,V_в$ — расход кислорода воздуха. Кроме того, напишем еще константу равновесия реакции:

$$K_C^V = \frac{CO_2 \cdot H_2}{CO \cdot H_2O} = \frac{xu}{yz}.$$

Решая уравнения и подставляя значения неизвестных в формулы, находим количество и состав продуктов сгорания.

Пример 4-2. Определить состав продуктов неполного сгорания ставропольского природного газа при коэффициенте расхода воздуха $\alpha = 0{,}5$. Состав сухого газа в объемных процентах:

$$CO_2 = 0{,}1\%;\ CH_4 = 98\%;\ C_2H_6 = 0{,}4\%;\ C_3H_8 = 0{,}2\%\ и\ N_2 = 1{,}3\%.$$

Теплота сгорания газа $Q_н^c = 35\,600$ *кдж/м³*. Температуру камеры сгорания принять 1 300 °С.

Расход воздуха на 100 $м^3$ газа по формуле (4-12)

$$v_в = 4{,}76 \cdot 0{,}5(2 \cdot 98 + 3{,}5 \cdot 0{,}4 + 5 \cdot 0{,}2) = 472{,}2\ м^3.$$

Количество азота N_2 в защитном газе

$$N_2 = 0{,}79 \cdot 472{,}2 + 1{,}3 = 373{,}18\ м^3.$$

В 100 $м^3$ ставропольского газа содержится:

CO_2 — 0,1 $м^3$; CH_4 — 98 $м^3$; C_2H_6 — 0,4 $м^3$; C_3H_8 — 0,2 $м^3$ и N_2 — 1,3 $м^3$.

В результате неполного сгорания получим:

CO_2 — x, $м^3$; CO — y, $м^3$; H_2O — z, $м^3$; H_2 — u, $м^3$; N_2 — 373,18 $м^3$.

Составим четыре уравнения с четырьмя неизвестными.

По материальному балансу углерода

$$x + y = 0{,}1 + 98 + 2 \cdot 0{,}4 + 3 \cdot 0{,}2 = 99{,}5;$$

по балансу водорода

$$2z + 2u = 4 \cdot 98 + 6 \cdot 0{,}4 + 8 \cdot 0{,}2 = 396;$$

по балансу кислорода

$$2x+y+z=2\cdot 0{,}1+2\cdot 0{,}21\cdot 472{,}2=198{,}2;$$

константа равновесия водяного газа

$$K_C^V=\frac{CO_2\cdot H_2}{CO\cdot H_2O}=\frac{xu}{yz}.$$

Значение константы равновесия при 1 300 °С: $K_C^V=0{,}327$ (по табл. [Л. 1]).

Из написанных уравнений находим:

$$x=17{,}3;\ y=82{,}2;\ z=81{,}4\ \text{и}\ u=116{,}6.$$

Колнчество продуктов неполного горения при $\alpha=0{,}5$, отнесенное к 1 $м^3$ газа, следовательно, будет:

$$v_{CO_2}=0{,}173;\ v_{CO}=0{,}822;\ v_{H_2O}=0{,}814;\ v_{H_2}=1{,}166\ \text{и}\ v_{N_2}=3{,}72\ м^3/м^3.$$

Общий выход газов $v_г=6{,}69\ м^3/м^3$.

Состав газов:

$$CO_2=2{,}6\%;\ CO=12{,}3\%;\ H_2O=12{,}1\%;\ H_2=17{,}6\%\ \text{и}\ N_2=55{,}4\%.$$

Расчет газификации мелкозернистого твердого и жидкого топлива в полугазовых топках с кипящим слоем и в циклонных топках (предтопках). Мелкозернистое твердое топливо газифицируется в полугазовых топках с кипящим слоем весьма интенсивно. Высокой интенсивностью процесса характеризуются и циклонные полугазовые топки (называемые также предтопкамн). При расчете в обоих случаях приходится принимать упрощающие допущения: считать, что в топке имеется лишь одна зона — зона газификации, в силу чего отсутствуют продукты сухой перегонки (смола, тяжелые углеводороды, сероводород) и сажистый углерод, а при высоких температурах (1 100 °С и более) отсутствует и метан, образующийся при более низких температурах по реакции $C+2H_2\longrightarrow CH_4$.

Состав топлива в процентах по массе

$$C^р+H^р+S^р_л+O^р+N^р+W^р+A^р=100\ \%.$$

Расчет для удобства сначала будем вести на 100 $кг$ топлива, а затем выходы газов будем относить к 1 $кг$ топлива. Поскольку в данном случае имеют место гетерогенные реакции, материальные балансы их следует составлять в киломолях.

Пусть процесс идет с коэффициентом расхода воздуха α, значение которого будет меньше единицы.

Расход кислорода воздуха на газификацию найдется из формулы

$$m_{O_2}=\alpha\left(\frac{K^р}{12}+\frac{H^р}{2\cdot 2}-\frac{O^р}{32}\right),\ кмоль; \tag{4-56}$$

здесь $K^р$ — количество условного углерода,

$$K^р=C^р+0{,}375\,S^р_л,\ \%.$$

Общий выход продуктов газификации будет:

$$m_г=m_{RO_2}+m_{CO}+m_{H_2}+m_{CH_4}+m_{H_2O}+m_{N_2},\ кмоль \tag{4-57}$$

или

$$v_г=v_{RO_2}+v_{CO}+v_{H_2}+v_{CH_4}+v_{H_2O}+v_{N_2},\ м^3/кг. \tag{4-58}$$

Напишем следующие уравнения материальных балансов.

Для углерода

$$m_{RO_2}+m_{CO}+m_{CH_4}=\frac{K^р-(C_ш+C_у)}{12}, \tag{4-59}$$

где $C_ш$ и $C_у$ — потери углерода со шлаком и уносом.

Для водорода

$$m_{H_2}+m_{H_2O}+2m_{CH_4}=\frac{H^р-H_у}{2}+\frac{W^р+100W_{дут}}{18\cdot 2}, \tag{4-60}$$

где $W_{дут}$ — количество водяного пара с дутьем, $кг/кг$.

Для кислорода

$$m_{RO_2}+0{,}5m_{CO}+0{,}5m_{H_2O}=m_{O_2}+\frac{W^р+100W_{дут}}{18\cdot 2}. \tag{4-61}$$

Для азота

$$m_{N_2} = \frac{79}{21} m_{O_2} + m_{N^p}, \qquad (4\text{-}62)$$

где m_{N^p} — количество азота в топливе, *кмоль*.

Кроме того, задавшись температурой процесса (с последующей проверкой), напишем константы равновесия реакций:

$$K^{IV} = \frac{m_{CH_4}}{m_{H_2}^2}; \qquad (4\text{-}63)$$

$$K^{V} = \frac{m_{CO_2} m_{H_2}}{m_{CO} m_{H_2O}}. \qquad (4\text{-}64)$$

Решая совместно эти уравнения, находим выход продуктов газификации, а затем их состав в объемных процентах и теплоту сгорания.

4-3. РАСЧЕТ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

В последние годы внедряются печи для безокислительного газового нагрева стали, принцип действия которых описан на стр. 13. Особенно пригоден для отопления таких печей природный газ, сжигая который в рабочей камере печи с коэффициентом расхода воздуха $\alpha \approx 0{,}5$, получают защитные газы, предохраняющие металл от окисления; эти газы и нагревают металл. После нагрева защитные газы поступают в камеру дожигания, а затем продукты полного горения направляются для использования в рекуператор. Выше был изложен упрощенный метод расчета полугазового процесса по В. Ф. Копытову.

Сначала определяют состав и теплоту сгорания продуктов неполного горения, отнесенную к 1 $м^3$ исходного газа $Q'^{c}_{н}$, а затем находят калориметрическую температуру горения по формуле

$$t_к = \frac{Q''^{c}_{н} + Q_ф}{v_{CO_2} c_{CO_2} + v_{CO} c_{CO} + v_{H_2O} c_{H_2O} + v_{H_2} c_{H_2} + v_{N_2} c_{N_2}}; \ ^\circ C; \qquad (4\text{-}65)$$

здесь $Q''^{c}_{н}$ — количество тепла, выделенного при неполном горении газа.

Расчет дожигания продуктов неполного горения ведут по изложенному ранее методу расчета полного горения газообразного топлива.

Пример 4-3. Для продуктов неполного горения ставропольского природного газа, определенных в примере 4-2, найти калориметрическую температуру горения при температуре воздуха $t_в = 0\ ^\circ C$ и $t_в = 800\ ^\circ C$.

Теплота сгорания защитного газа

$Q^c_н = 126\,CO + 108\,H_2 = 126 \cdot 12{,}3 + 108 \cdot 17{,}6 = 3\,480$ *кдж/м*³, или на 1 *м*³ исходного газа $[Q'^c_н = 6{,}69 \cdot 3\,480 = 23\,300$ *кдж/м*³.

Выделено тепла при неполном горении газа

$$Q''^{c}_{н} = 35\,600 - 23\,300 = 12\,300\ кдж/м^3.$$

Калориметрическая температура неполного горения при температуре воздуха $t_в = 0\ ^\circ C$

$$t_к = \frac{12\,300 \cdot 100 + 0}{17{,}3 \cdot 2{,}29 + 82{,}2 \cdot 1{,}44 + 81{,}4 \cdot 1{,}77 + 116{,}6 \cdot 1{,}35 + 372 \cdot 1{,}43} = 1\,300\ ^\circ C.$$

Калориметрическая температура при температуре воздуха $t_в = 800\ ^\circ C$:

$$t_к = \frac{12\,300 \cdot 100 + 472 \cdot 1{,}38 \cdot 800}{17{,}3 \cdot 2{,}41 + 82{,}2 \cdot 1{,}49 + 81{,}4 \cdot 1{,}89 + 116{,}6 \cdot 1{,}39 + 372 \cdot 1{,}47} = 1\,700\ ^\circ C.$$

ГЛАВА ПЯТАЯ

ТЕПЛООБМЕН В ПЕЧАХ

5-1. ОРГАНИЗАЦИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ПЕЧАХ

В промышленных печах одновременно протекает ряд сложных процессов: горение и газификация топлива, движение продуктов горения в рабочем пространстве, теплообменные и массообменные процессы, связанные с экзотермическими или эндотермическими химическими превращениями обрабатываемых материалов и т. д. Все эти процессы взаимно связаны, и их совокупность составляет суммарный процесс тепловой обработки материалов. Важнейшим из них является процесс теплопередачи.

В печах подвергаются нагреву разнообразные металлы и неметаллические материалы: керамические (обжиг огнеупоров, строительного кирпича и т. д.), сырье вяжущих материалов (обжиг цементного клинкера, извести, гипса), химическое сырье (обжиг серного колчедана, хлористого кальция и т. д.) и др. В плавильных процессах нагрев предшествует плавлению. Во всех печах для нагрева слитков и заготовок перед прокаткой и ковкой, а также в печах для термообработки металлических деталей нагрев осуществляется через поверхность изделий, уложенных в рабочем пространстве, причем изделия неподвижны или медленно перемещаются. Отформованные керамические изделия — кирпич и фасонные изделия — часто складываются в клетки (садка или насадка кирпича), неподвижно стоящие в печи или медленно в ней перемещающиеся.

Теплообмен зависит от способа нагрева. Ниже приводится классификация способов нагрева материалов или изделий в печах, отапливаемых органическим топливом.

По виду технологического процесса различают нагрев материала без изменения или с изменением структуры и физико-химических свойств, плавление шихтовых материалов. По способу использования теплоносителей различают открытый (прямой) нагрев продуктами полного или неполного горения (безокислительный нагрев); косвенный нагрев с муфелированием (изоляцией) продуктов сгорания или изделий; нагрев в «кипящем» слое промежуточного теплоносителя, в расплавленных жидких средах (расплавленном стекле, в соляных растворах). По аэродинамическому состоянию нагреваемого материала различают нагрев в плотном слое материала; нагрев в «кипящем» слое материала; нагрев во взвешенном слое материала (спутное движение, противоточное, вихревое — циклонное).

Нагрев в печах производится открытым способом и реже косвенным путем. Наиболее простым является *открытый нагрев* (рис. 5-1), при котором дымовые газы непосредственно соприкасаются с нагреваемыми изделиями (материалом). Этот способ применяется в подавляющем большинстве печей. Сюда относятся плавильные печи, печи для нагрева стальных слитков и заготовок перед прокаткой, ковкой и т. д., печи для обжига огнеупорных изделий и т. д.

Печи с прямым нагревом в свою очередь делятся на печи с большим свободным объемом рабочего пространства, шахтные печи для обработки кусковых материалов, печи с кипящим слоем, циклонные печи и др. На рис. 5-1,*а* изображена схема печи с большим свободным объемом рабочего пространства. Нагреваемый материал, изделия или шихта лежат на полу, а над ним имеется значительный свободный объем, в котором могут протекать реакции горения топлива. Наличие свободного объема позволяет приблизить горящий факел к нагреваемому материалу, что очень выгодно, так как при этом теплопередача становится весьма интенсивной. Это обеспечивает высокую производительность пе-

чи и как следствие малый удельный расход тепла на обработку. Поэтому для высокотемпературных печей отдельные топки строятся редко; большей частью топливо (газ, мазут, угольная пыль) сжигается в рабочем пространстве печи, в непосредственной близости от нагреваемых изделий.

Печи с большим свободным объемом рабочего пространства могут иметь разное назначение, и в них могут осуществляться разнообразные технологические процессы — плавка стали и цветных металлов, нагрев стальных слитков и заготовок перед прокаткой или ковкой и т. д. Средн

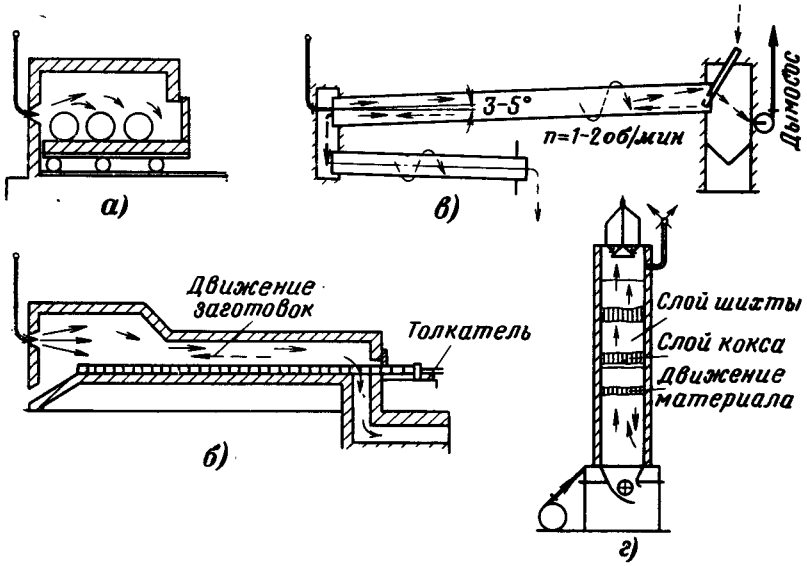


Рис. 5-1. Схемы открытого нагрева в печах.
а — камерная печь; *б* — методическая печь для нагрева стальных заготовок; *в* — вращающаяся барабанная печь; *г* — шахтная печь.

них имеются печи, в которых поддерживаются примерно одинаковые температуры во всех точках рабочего пространства, например камерные печи и печи с переменной температурой в рабочем пространстве, например методические печи для нагрева стальных заготовок (рис. 5-1,*б*). Открытый нагрев стальных изделий и заготовок продуктами сгорания, содержащими CO_2, SO_2, H_2O и O_2, вызывает окисление поверхности металла или его обезуглероживание, и поэтому часто применяют нагрев в безокислительной среде. Это достигается сжиганием природного газа с малыми коэффициентами расхода воздуха $\alpha = 0{,}4 \div 0{,}5$, в результате чего получаются продукты неполного сгорания, в состав которых входят CO_2, CO, H_2, H_2O, N_2 и CH_4, причем в соотношениях, исключающих окисление и обезуглероживание стали. Для создания необходимого температурного уровня воздух, идущий на горение, нагревают до 800 °С или применяют кислород. В дальнейшем продукты неполного горения дожигаются и используются для нагрева воздуха и других целей.

Во *вращающихся барабанных печах,* употребляемых для обжига различных сыпучих или кусковых материалов (рис. 5-1,*в*), свободный объем располагается вдоль оси печи. Кладка печи, вращаясь вместе с барабаном, соприкасается попеременно то с греющими газами, то с нагреваемым материалом, что способствует более интенсивной передаче тепла.

В *шахтных печах,* применяемых для огневой обработки кусковых материалов, рабочее пространство заполнено слоем кускового материа-

ла (рис. 5-1,*г*) и дымовые газы движутся через узкие извилистые каналы, образуемые кусками материала, причем поперечное сечение этих каналов очень неравномерно по высоте печи и скорость газов все время изменяется. Изменение скорости способствует турбулизации потока и увеличению теплопередачи конвекцией, однако это одновременно повышает затраты энергии на продувку газов через слой материала.

Всякого рода сыпучий материал (в виде зерен или в дисперсном состоянии) в зависимости от аэродинамического режима движения газов в печи может нагреваться в печи либо слоевым способом, либо в кипящем слое, либо, наконец, во взвешенном состоянии.

Процессы в *«кипящем» слое мелкозернистого материала* идут с интенсивным теплообменом вследствие энергичного перемешивания материала по всему объему печи без применения специальных механизмов и большой удельной поверхности обрабатываемого материала и хорошим обтеканием его греющими газами. Поэтому печи с кипящим слоем (рис. 2-2,*б*) получили распространение: в металлургии для обжига мелкозернистых руд и концетратов, для обжига известняка и пр.; в химической промышленности для обжига серного колчедана, а также в печах с катализом в кипящем слое при окислении сернистого ангидрида, аммиака и пр.; в нефтеперерабатывающей промышленности для катализного крекинга нефтепродуктов.

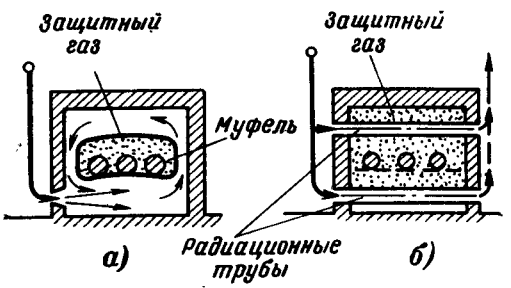


Рис. 5-2. Схемы косвенного нагрева в печах.
а — муфельная печь; *б* — печь с радиационными трубами.

Циклонный способ нагрева получает все большее распространение благодаря интенсивности процессов теплообмена в них, что обеспечивает большую производительность циклонных печей. Циклонные печи (рис. 1-13) применяются в химической промышленности для обжига серного колчедана, суперфосфатов и других продуктов. В силу перспективности циклонного способа нагрева в настоящее время проводится много работ по исследованию применения его в разных производствах.

При *косвенном нагреве* материал изолирован от дымовых газов и тепло от газов передается к нему через разделяющую поверхность нагрева. Так, в коксовых печах теплопередача от дымовых газов к угольной шихте идет через боковые стенки реторт, выложенные из динасового кирпича. Этим достигается осуществление процесса сухой перегонки угля без доступа воздуха. Примерами печей с косвенным нагревом являются также муфельные печи и печи с радиационными трубами (рис. 5-2).

В муфельных печах для термообработки стальных деталей (отжиг, закалка, отпуск, нормализация, цементация) изоляция обрабатываемых изделий от дымовых газов осуществляется с помощью муфеля. Непосредственный контакт греющих дымовых газов со стальными деталями здесь недопустим, так как приводит к окислению или обезуглероживанию стали. Изделия проходят через муфель (рис. 5-2,*а*), заполненный защитным газом, который не вступает с ними в химическое ваимодействие. Передача тепла идет через стенки муфеля. В печах с радиационными трубами (рис. 5-2,*б*) раскаленные дымовые газы проходят через излучательные (радиационные) трубы, изготовленные из жаростойкого металла. Тепло передается через стенки труб, а печное пространство заполняется защитным газом. Косвенный нагрев по сравнению с прямым является более сложным и дорогим.

5-2. ВНЕШНИЙ И ВНУТРЕННИЙ ТЕПЛООБМЕН

Сложный процесс теплообмена принято условно разделять на две части: внешний и внутренний теплообмен. *Внешний* теплообмен представляет собой процесс передачи тепла от печного пространства к наружной поверхности нагреваемого материала или изделий. *Внутренний* теплообмен — это процесс теплопередачи теплопроводностью от внешней поверхности в толщу нагреваемого материала за счет разности температур поверхности и внутренних слоев материала. Прогрев массы материала зависит от свойств материала, его формы и размеров, и внутренним теплообменом управлять труднее, чем внешним.

В зависимости от технологических процессов, протекающих в печах, передача тепла лимитируется либо внешним, либо внутренним теплообменом. Например, в печах для расплавления стали и чугуна производительность определяется внешним теплообменом (если расплавленный металл непрерывно стекает с кусков шихты и здесь нет ограничений в развитии интенсивности нагрева), а в нагревательных печах при нагреве массивных тел теплопередача (а следовательно, и производительность) лимитируется внутренним теплообменом, ограниченным теплопроводностью нагреваемых материалов. Кроме того, материал согласно технологии часто прогревается по строго определенному режиму во избежание порчи (появления трещин из-за больших градиентов температур и т. д.).

В рабочем пространстве печи движутся с различными скоростями дымовые газы, которые излучают тепло благодаря присутствию в них трехатомных газов — двуокиси углерода CO_2, двуокиси серы SO_2 и водяных паров H_2O, а также частиц углерода, золы и пыли.

В отличие от твердых черных тел трехатомные газы излучают энергию не во всех частях спектра. Спектр излучения этих газов отличается большой избирательностью, т. е. он имеет отдельные области активного излучения. В то же время, если твердые тела излучают энергию с поверхности, то газы излучают энергию всем объемом, так как молекулы газа находятся друг от друга на большом расстоянии.

Степень черноты газа $\varepsilon_г$ зависит от температуры газа T, °К и от произведения $p_i s$, где p_i — парциальное давление газа и s — эффективная толщина слоя газа:

$$\varepsilon_г = f(p_i,\ s,\ T). \qquad (5\text{-}1)$$

При расчетах для определения величины $\varepsilon_г$ пользуются графиками, составленными на основании экспериментальных данных.

В рабочем пространстве топок и печей не всегда движутся только продукты полного горения; очень часто в нем находится пламя, которое может быть бесцветным или светящимся, причем светимость определяется наличием в нем дисперсного сажистого углерода, получающегося при разложении углеводородных соединений. Эти частицы имеют размеры порядка 0,2 *мкм* (что соизмеримо с длинами волн видимого светового излучения), и в 1 $см^3$ содержатся десятки и сотни миллионов частиц. Если бы ярко светящийся факел, имеющий высокую температуру, можно было внезапно «заморозить», то сажистый несгоревший углерод можно было бы собрать и взвесить. Помимо сажистого углерода в пламени могут находиться во взвешенном состоянии частицы угольной пыли и летучей золы, имеющие размеры от 10 до 1 000 *мкм*.

Взвешенные в потоке газов частицы сажистого углерода увеличивают степень черноты факела и его излучательную способность. Поэтому при отоплении высокотемпературных печей газообразным топливом, содержащим мало высокомолекулярных углеводородов и сгорающим прозрачным пламенем (например, сухим природным газом), иногда прибегают к искусственному повышению степени черноты факела посредством самокарбюрации или путем добавления к газообразному топливу

тонкораспыленной смолы или мазута. Так, например, при отоплении мартеновских печей природным газом карбюрация осуществляется путем его совместного сжигания с мазутом, добавляемым в количестве 20—30% по расходу тепла.

Степень черноты светящегося пламени (факела) зависит от ряда факторов: а) от свойств топлива, главным образом от выхода летучих веществ (твердое топливо), или от содержания в нем углеводородистых соединений и смол (газообразное топливо); б) от подготовки топлива перед сжиганием, например, при сжигании мазута — от степени его подогрева и тонкости распыливания, при сжигании пылевидного топлива — от тонкости его помола; в) от способа смешения топлива с воздухом, т. е. от конструкции форсунок или горелок и режима их работы; г) от конструкции топочного пространства и режима его работы, от эффективной толщины газового слоя, от температуры, от интенсивности циркуляции газовых потоков и от других условий.

При расчете все эти факторы трудно оценить. Приближенно считают, что степень черноты факела $\varepsilon_г$ складывается из степеней черноты светящейся $\varepsilon_{г.св}$ и невидимой частей его $\varepsilon_{г.н.св}$:

$$\varepsilon_г = m\varepsilon_{г.св} + (1-m)\varepsilon_{г.н.св}, \qquad (5\text{-}2)$$

где m — опытный коэффициент, учитывающий долю заполнения топочного объема светящимся факелом (определяется по графику ЦКТИ); $\varepsilon_{г.н.св}$ — степень черноты сгоревших газов,

$$\varepsilon_{г.н.св} = 1 - e^{-k_г p_п s}; \qquad (5\text{-}3)$$

здесь $k_г$ — коэффициент ослабления лучей трехатомными газами CO_2 и H_2O; $p_п$ — парциальное давление этих газов; s — эффективная толщина излучающего слоя.

Степень черноты светящихся газов

$$\varepsilon_{г.св} = 1 - e^{-k_{св} ps}, \qquad (5\text{-}4)$$

где $k_{св} = k_г r_п + k_{саж}$, причем по эмпирической формуле ЦКТИ

$$k_{саж} = 0{,}0055\,(3{,}9-\alpha)\,(1{,}6T_{о.г}10^{-3} - 0{,}5)\left(\frac{C^р}{H^р}\right)^2; \qquad (5\text{-}5)$$

здесь α — коэффициент избытка воздуха в топке; $C^р/H^р$ — отношение масс углерода и водорода в рабочей массе топлива.

5-3. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В ПЕЧАХ С БОЛЬШИМ ОБЪЕМОМ СВОБОДНОГО РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА

В рабочем пространстве печи имеет место сложный теплообмен всеми способами: лучеиспусканием, конвекцией (соприкосновением) и теплопроводностью (рис. 5-3). Эти способы теплообмена проявляются одновременно и сочетаются друг с другом; так, конвекция тепла в газах и жидкостях идет одновременно с теплопроводностью (кондукцией), лучеиспускание имеет место одновременно с конвекцией (*радиационно-конвективный теплообмен*), или с теплопроводностью (*радиационно-кондуктивный теплообмен*). Тепло от раскаленных газов передается как непосредственно поверхности нагреваемых изделий лучеиспусканием и конвекцией, так и своду, стенам и поду печи (также лучеиспусканием и конвекцией). Внутренняя поверхность огнеупорной кладки печи, нагреваясь, передает теплу лучеиспусканием поверхности материала через слой движущихся газов, частич-

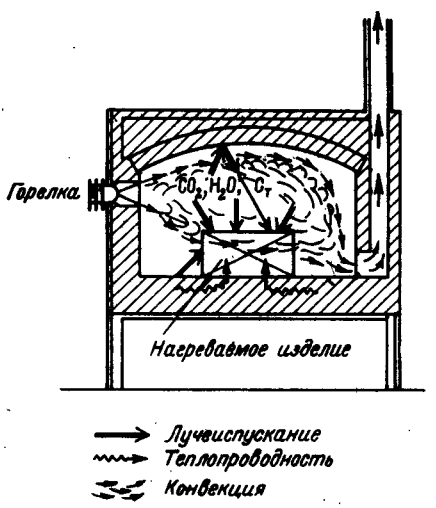


Рис. 5-3. Схема теплообмена в камерной печи.

но поглощающих это тепло. Таким образом, свод, стены и под играют роль вторичных излучателей. Часть тепла, идущая от газов к своду, стенам и поду, проходит через кладку вследствие ее теплопроводности и теряется в окружающую среду. Изделия соприкасаются с подом печи, и от раскаленного пода тепло отчасти передается также и путем теплопроводности. Наконец, внутрь нагреваемых изделий тепло передается посредством теплопроводности.

Количество тепла, полученное нагреваемым материалом от газов и от кладки:

$$Q_{\text{г.км}} = Q^{\text{л}}_{\text{г.м}} + Q^{\text{л}}_{\text{к.м}} + Q^{\text{к}}_{\text{г.м}}, \qquad (5\text{-}6)$$

где $Q^{\text{л}}_{\text{г.м}}$ — тепло, переданное материалу от газов лучеиспусканием; $Q^{\text{к}}_{\text{г.м}}$ — тепло, переданное материалу от газов конвекцией; $Q^{\text{л}}_{\text{к.м}}$ — тепло, переданное материалу от кладки лучеиспусканием.

Свод печи и другие ее ограждения представляют собой как бы рефлектор: кладка поглощает энергию, излучаемую газами, и в свою очередь посылает лучистую энергию на нагреваемый материал. Роль поверхностей косвенного нагрева определяется слагаемым $Q^{\text{л}}_{\text{к.м}}$. В металлургических печах излучение кладки в практических условиях может составить 40—60% общего количества тепла, полученного материалом.

5-4. РЕЖИМЫ ТЕПЛООБМЕНА В НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ И ПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ

Режимы внешнего теплообмена в печах по М. А. Глинкову [Л. 2] делят на радиационный, конвективный и слоевой. Если речь идет о радиационном нагреве, то это означает лишь, что лучистый теплообмен имеет превалирующее значение, но одновременно с ним осуществляется и конвективный теплообмен; то же можно сказать и о конвективном нагреве.

Радиационный нагрев в свою очередь делится на три вида: 1) равномерно распределенный теплообмен (рис. 5-4,*а*), когда падающие тепловые потоки от факела (пламени) на кладку $Q_{\text{г.к}}$ и на поверхность нагреваемого материала $Q_{\text{г.м}}$ равны между собой, температурное поле и излучательные свойства факела равномерны во всем объеме; 2) направленный прямой теплообмен (рис. 5-4,*б*), когда $Q_{\text{г.м}} > Q_{\text{г.к}}$ и 3) направленный косвенный теплообмен, когда $Q_{\text{г.м}} < Q_{\text{г.к}}$ (рис. 5-4,*в*). Поскольку лучеиспускание тесно связано с конвекцией, то правильнее говорить о радиационно-конвективном нагреве, т. е. разделение его имеет условный характер. Поэтому падающие потоки рассматриваются как сумма лучистой и конвективной составляющих.

На рис. 5-4 показаны изменения температуры и скорости газов для двух случаев сжигания газа: *1* — в объеме и *2* — в пристенном слое (что важно при направленном косвенном теплообмене).

Роль отдельных видов теплообмена может быть различной. Так, если конвекцией на материал передано всего 10% тепла, то суммарная роль конвекции в теплоотдаче к изделиям может составить 65%, так как тепло, переданное конвективно кладке, трансформировано в тепло, переданное лучеиспусканием от кладки к изделиям. В разных печах по-разному реализуются режимы нагрева. Так, в плавильных печах выгоднее использовать радиационный прямой направленный теплообмен, когда светящийся факел обладает настильностью, т. е. направляется на шихту. В нагревательных печах в зоне высоких температур выгоднее направленный косвенный теплообмен, когда сильно разогревается кладка свода специальными плоскопламенными горелками, расположенны-

ми на своде и последний интенсивно облучает изделия. Такой режим обеспечивает лучшие показатели работы печей по производительности и удельному расходу топлива, чем при других режимах.

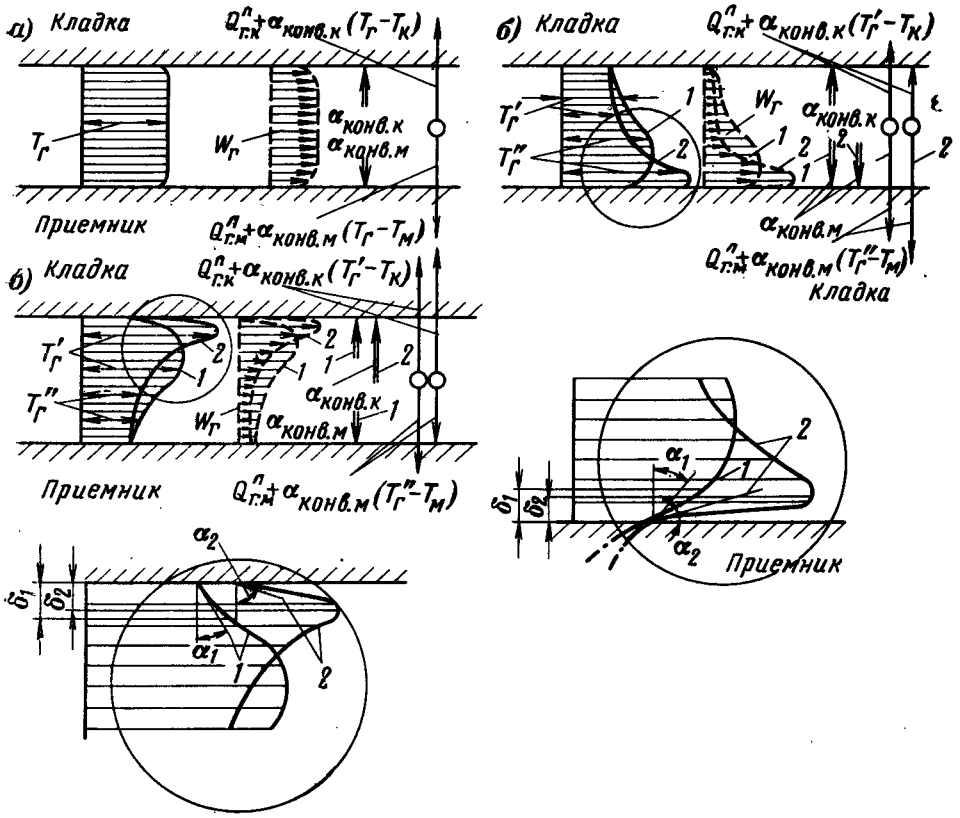


Рис. 5-4. Режимы радиационно-конвективного теплообмена в нагревательных печах.
а — равномерно распределенный; *б* — прямо направленный; *в* — косвенно направленный; δ — толщина пристенного слоя газов; $Q^{л}_{г.к}$ — лучистый тепловой поток от газов к кладке; $T_г$ и $T_к$ — температуры газов и кладки; $w_г$ — скорость газов; $\alpha_{конв.к}$ и $\alpha_{конв.м}$ — коэффициент теплоотдачи конвекцией от газов к кладке и к металлу.
——— — изменение температур газов; — — — — изменение скорости газов; *1* — при горении в объеме; *2* — при горении в пристенном слое.

5-5. РАВНОМЕРНО РАСПРЕДЕЛЕННЫЙ ВНЕШНИЙ ТЕПЛООБМЕН В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ ПЕЧИ

Если в печной камере имеется множество равномерно распределенных факелов или других источников излучения (панельных керамических горелок, излучающих элементов электрических сопротивлений и т. д.), то при расчете лучеиспускания в замкнутом пространстве выражение для суммарного теплового потока от факела (газов) и кладки к нагреваемому материалу $Q^{л}_{г.к.м}$ можно привести к классическому закону Стефана — Больцмана:

$$Q^{л}_{г.к.м}=C_0\varepsilon_в H_л \xi\left[\left(\frac{T_г}{100}\right)^4-\left(\frac{T_м}{100}\right)^4\right]_{ср}=C_в H_л \xi \Delta; \qquad (5\text{-}7)$$

здесь C_0 — коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела, $C_0=5{,}67$ *вт*/(*м*$^2\cdot$°K^4); $\varepsilon_в$ — приведенная (видимая) степень черноты печного (топочного) пространства; $T_г$ и $T_м$ — абсолютные температуры газов и материала; ξ — условный коэффициент загрязнения лучевоспринимаю-

щей поверхности технологическим уносом, окалиной и пр. ($\xi=0{,}6\div 0{,}75$); Δ — усредненное значение разности четвертых степеней абсолютных температур.

Допуская, что потери тепла в окружающую среду равны теплу, получаемому кладкой за счет конвекции, В. Н. Тимофеев предложил формулу для определения приведенной степени черноты:

$$\varepsilon_{\text{в}}=\frac{\varepsilon_{\text{м}}\varepsilon_{\text{г}}\psi(1-\varepsilon_{\text{г}})+1}{\psi(1-\varepsilon_{\text{в}})[\varepsilon_{\text{м}}+\varepsilon_{\text{г}}(1-\varepsilon_{\text{м}})]+\varepsilon_{\text{г}}}, \tag{5-8}$$

где $\varepsilon_{\text{г}}$ и $\varepsilon_{\text{м}}$ — степень черноты газов и нагреваемого материала; $\psi=H_{\text{л}}/F_{\text{к}}$ — коэффициент, представляющий собой отношение лучевоспринимающей поверхности нагрева изделий $H_{\text{л}}$ к суммарной внутренней поверхности кладки $F_{\text{к}}$; обратная ему величина называется степенью развития обмуровки ω.

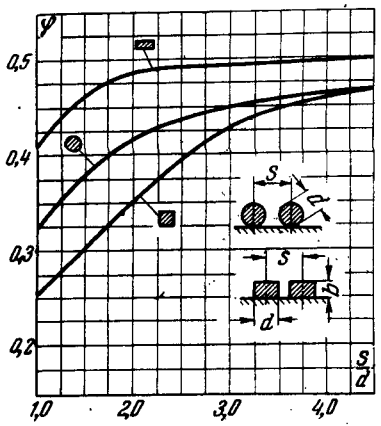


Рис. 5-5. Диаграмма угловых коэффициентов φ, отнесенных к полной боковой поверхности нагреваемых изделий.

Лучевоспринимающая поверхность меньше полной поверхности изделий $F_{\text{м}}$ и связана с ней отношением $H_{\text{л}}=\varphi F_{\text{м}}$, где φ — средний угловой коэффициент или коэффициент облученности, отнесенный к полной боковой поверхности нагреваемых изделий (он может быть отнесен также к полной поверхности пода). Этот коэффициент является чисто геометрическим параметром, который определятся формой поверхностей, их размерами, взаимным расположением и расстоянием между ними. Величина φ зависит от геометрической формы нагреваемых изделий, а также от способа их расположения на поду.

Значения φ для цилиндрических и прямоугольных заготовок приведены на рис. 5-5.

Для сложных систем вычислить значение углового коэффициента трудно. Часто представляется возможным воспользоваться методом поточной алгебры (метод Г. Л. Поляка). В очень сложных случаях φ определяется экспериментально, с учетом того, что в геометрически подобных системах угловые коэффициенты равны.

Для электрических печей сопротивления видимая степень черноты будет:

$$\varepsilon_{\text{в}}=\varepsilon_{\text{м}}\varepsilon_{\text{изл}}\frac{\psi+1}{\psi(\varepsilon_{\text{м}}+\varepsilon_{\text{изл}}-\varepsilon_{\text{м}}\varepsilon_{\text{изл}})+\varepsilon_{\text{изл}}}, \tag{5-9}$$

где $\varepsilon_{\text{изл}}$ — степень черноты излучателей.

В формулу (5-7) вместо $(T_{\text{г}}/100)^4$ подставляется $(T_{\text{изл}}/100)^4$, где $T_{\text{изл}}$ — абсолютная температура излучателя.

Для удобства расчета Д. В. Будрин преобразовал формулу (5-8), разделив числитель и знаменатель правой части этой формулы на $\varepsilon_{\text{г}}\psi$; тогда

$$C_0\varepsilon_{\text{в}}=C_0(\varepsilon_{\text{м}}\varepsilon_{\text{п}}), \tag{5-10}$$

где

$$\varepsilon_{\text{п}}=\frac{\frac{1}{\psi}+1-\varepsilon_{\text{г}}}{[\varepsilon_{\text{м}}+\varepsilon_{\text{г}}(1-\varepsilon_{\text{м}})]\frac{1-\varepsilon_{\text{г}}}{\varepsilon_{\text{г}}}+\frac{1}{\psi}}=\frac{\omega+1-\varepsilon_{\text{г}}}{\beta\frac{1-\varepsilon_{\text{г}}}{\varepsilon_{\text{г}}}+\omega}. \tag{5-11}$$

Величина $\varepsilon_п$ может быть названа приведенной степенью черноты печного пространства. На рис. 5-6 дан график для определения множителя $\varepsilon_п$ в зависимости от $\varepsilon_г$ при разных значениях величины β, определяемой по формуле

$$\beta=\varepsilon_м+\varepsilon_г(1-\varepsilon_м). \qquad (5\text{-}12)$$

По Д. В. Будрину при нагреве черноты окисленных металлов величина β меняется в узких пределах — от 0,85 до 0,95.

Температура газов не остается неизменной, а изменяется по ходу их от наивысшей до температуры, с которой газы уходят из печного пространства $t_{о.г}$, температура нагреваемого материала изменяется от начальной $t'_м$ до конечной $t_м$. Поэтому при расчете температуры усредняют и в формулу (5-7) подставляют среднеэффективную разность четвертых степеней температур газов и нагреваемого материала, полученную эмпирическим приемом усреднения:

$$\Delta_I=\left[\left(\frac{T_г}{100}\right)^4-\left(\frac{T_м}{100}\right)^4\right]_{ср}=$$

$$=\sqrt{\left[\left(\frac{T_т}{100}\right)^4-\left(\frac{T_м}{100}\right)^4\right]\left[\left(\frac{T_{о.г}}{100}\right)^4-\left(\frac{T'_м}{100}\right)^4\right]}, \qquad (5\text{-}13)$$

где $T_т$ — абсолютная теоретическая температура сгорания топлива при заданных условиях, если сжигание производится в рабочем пространстве печи, или температура, с которой газы попадают в рабочее пространство, если сжигание топлива производится в обособленной топке, °К; $T'_м$ и $T_м$ — абсолютные начальная и конечная температуры материала, °К; $T_{о.г}$ — абсолютная температура газов, отходящих от рабочего пространства печи, °К.

Если выразить температуры в долях от абсолютной температуры сгорания и ввести безразмерные температуры $\theta_г=T_г/T_т$; $\theta_т=1$; $\theta_м=T_м/T_т$; $\theta_{о.г}=T_{о.г}/T_т$, то мы будем иметь, пренебрегая значением безразмерной величины начальной температуры материала $\theta_{о.м}=T'_м/T_т\approx 0$,

$$\Delta_{I\,ср}=(\theta_г^4-\theta_м^4)_{ср}=\sqrt{(1-\theta_м^4)\theta_{о.г}^4}=\theta_{о.г}^2\sqrt{1-\theta_м^4}. \qquad (5\text{-}14)$$

Когда меняется только температура газов, усреднение производят по формуле

$$\left(\frac{T_г}{100}\right)^4=n\left(\frac{T_т}{100}\right)^2\left(\frac{T_{о.г}}{100}\right)^2, \text{ °К}, \qquad (5\text{-}15)$$

где n — коэффициент, учитывающий объемное тепловыделение факела, $n\approx 0{,}774$.

$$\Delta_{2\,ср}=0{,}774\theta_{о.г}^2-\theta_м^4.$$

Тогда обобщенная расчетная формула (5-7) приобретает вид:

$$Q^л_{г.к.м}=C_0\varepsilon_в H_л\xi\left(\frac{T_г}{100}\right)^4\Delta_{ср}. \qquad (5\text{-}16)$$

В вышеприведенных формулах учитывается лишь теплоотдача излучением, играющая главнейшую роль в высокотемпературных печах. Для определения величины конвективной теплоотдачи служит формула

$$Q^к_{г.м}=\alpha_к F_м(t_г-t_м), \qquad (5\text{-}17)$$

где $\alpha_к$ — коэффициент теплоотдачи конвекцией от газов к внешней поверхности изделий.

Таким образом, полное количество тепла, переданного материалу:

$$Q_{г.к.м}=C_0\varepsilon_в\xi\beta_{конв}H_л\left(\frac{T_г}{100}\right)^4\Delta_{ср}. \qquad (5\text{-}18)$$

Здесь множитель, заключенный в скобках и обозначенный через $\beta_{конв}$, определяется соотношением лучистого и конвективного теплообмена.

Для анализа уравнений (5-8) и (5-12) предположим, что печь не имеет обмуровки, т. е. $F_к=0$ и $\omega=F_к/H_л=0$ и что степень черноты нагреваемого материала $\varepsilon_м=1$. Тогда $C_в=C_г=C_0\varepsilon_г$, т. е. при одной и той же температуре светящийся факел излучает больше тепла в единицу времени, чем факел прозрачный.

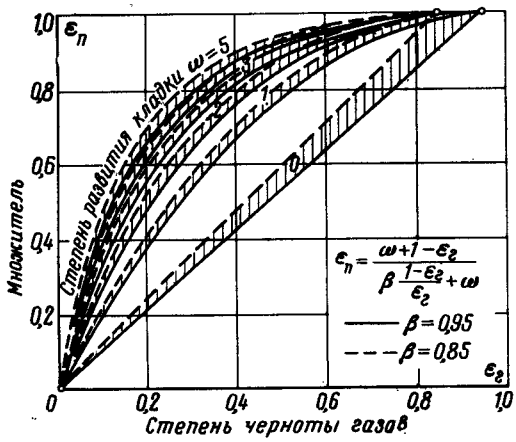


Рис. 5-6. Множитель $\varepsilon_п$ для расчета приведенной степени черноты печного пространства в зависимости от степени черноты печных газов $\varepsilon_г$ для разных степеней развития кладки (по Д. В. Будрину).

Далее предположим наоборот, что $\omega=F_к/H_л=\infty$, тогда уравнение (5-8) будет иметь вид: $C_в=C_0\varepsilon_м$ При этом $C_в$ достигает своего максимального значения. Отсюда следует, что в данном случае влияние факела на теплопередачу отсутствует (такое положение имеет место, например, в том случае, когда в большой печи нагреваются мелкие изделия).

Все действительные случаи находятся между этими двумя предельными случаями. Приведенная степень черноты газов для них определяется по графику, представленному на рис. 5-6. Из этого графика видно, что влияние кладки тем больше, чем прозрачнее газы.

Часто при расчетах теплообмена в печах пользуются понятием температуры печи $T_п$. Она определяет собой температуру одного излучающего источника, заменяющего все фактически имеющиеся в печи излучающие источники.

Температура печи $T_п$ меньше температуры газов $T_г$ и выше температуры стен $T_{кл}$ и связана с ними следующим соотношением:

$$\left(\frac{T_п}{100}\right)^4\approx\varepsilon_г\left(\frac{T_г}{100}\right)^4+(1-\varepsilon_г)\left(\frac{T_{кл}}{100}\right)^4. \qquad (5\text{-}19)$$

Понятие о температуре печи упрощает приближенные расчеты, так как ее величину проще оценить, чем температуру газов и кладки. Использовав это понятие, можно написать следующее соотношение:

$$C_п\left[\left(\frac{T_п}{100}\right)^4-\left(\frac{T_м}{100}\right)^4\right]=C_в\left[\left(\frac{T_г}{100}\right)^4-\left(\frac{T_м}{100}\right)^4\right], \qquad (5\text{-}20)$$

или

$$C_п\Delta_п=C_в\Delta_г, \qquad (5\text{-}21)$$

где $C_п$ — приведеный коэффициент лученспускания, имеющий значение обычно от 3 до 4. Более точно $C_п$ находится из соотношения, вытекающего из формулы (5-21):

$$C_п=C_в\frac{\Delta_г}{\Delta_п}. \qquad (5\text{-}22)$$

Следует заметить, что температуру печи часто путают с температурой газов, чего нельзя делать, так как это приводит к большим ошибкам.

Температура печи определяется на основании расчета теплообмена, изложенного ниже. При ориентировочных расчетах температура печи определяется по формуле $t_п=\mu t_к$, где $t_к$ — калориметрическая температура горения топлива; μ — так называемый пирометрический коэффициент.

Пример 5-1. Определить производительность медеплавильной отражательной печи, изображенной на рис. 1-12, при работе на холодном дутье и при подогреве дутья до 800 °С в автономном воздухоподогревателе. Характеристика печи приведена в [Л. 19]. Топливо — высокосернистый мазут сжигаемый посредством воздушных форсунок с коэффициентом избытка воздуха $\alpha=1{,}1$ (учитывается присос воздуха в печи). Размеры рабочего пространства: общая длина ванны $L'=32$ *м*; длина плавильной зоны $L=26$ *м*; пролет свода $B=7{,}5$ *м*; высота газового слоя $h=1{,}5$ *м*; площадь плавильной ванны $F_0\cong H_л=7{,}5\cdot 26=195$ *м*^{2}. Состав высокосернистого мазута по рабочей массе:

$C^p=83{,}4\%$; $H^p=10{,}0\%$; $S^p_л=2{,}9\%$; $O^p+N^p=0{,}4\%$; $W^p=3{,}0\%$; $A^p=0{,}3\%$. Низшая теплота сгорания $Q^p_н=38{,}4$ *Мдж/кг*.

Качество теоретически необходимого сухого воздуха

$$v^0 = 0{,}0889\,(C^p + 0{,}375\,S^p_л) + 0{,}265\,H^p - 0{,}0333\,O^p = 0{,}0889\,(83{,}4 + 0{,}375\cdot 2{,}9) + 0{,}265\cdot 10{,}0 - 0{,}0333\cdot 0{,}2 = 10{,}15\ м^3/кг.$$

Теоретическое количество азота

$$v^0_{N_2} = 0{,}79v^0 + 0{,}8\,\frac{N^p}{100} = 0{,}79\cdot 10{,}15 + 0{,}8\,\frac{0{,}2}{100} = 8{,}02\ м^3/кг.$$

Количество сухих трехатомных газов

$$v_{RO_2} = 0{,}01866\,(C^p + 0{,}375 S^p_л) = 0{,}01866\,(83{,}4 + 0{,}375\cdot 2{,}9) = 1{,}58\ м^3/кг.$$

Теоретическое количество водяных паров

$$v^0_{H_2O} = 0{,}111H^p + 0{,}0124W^p + 0{,}0161v^0 = 0{,}111\cdot 10{,}0 + 0{,}0124\cdot 3{,}0 + 0{,}0161\cdot 10{,}15 = 1{,}32\ м^3/кг.$$

Количество водяных паров

$$v_{H_2O} = v^0_{H_2O} + 0{,}0161\,(\alpha - 1)\,v^0 = 1{,}32 + 0{,}0161\cdot 0{,}1\cdot 10{,}15 = 1{,}336\ м^3/кг.$$

Количество дымовых газов

$$v_г = v_{RO_2} + v_{N_2} + v_{H_2O} + (\alpha - 1)\,v^0 = 1{,}58 + 8{,}02 + 1{,}32 + 0{,}1\cdot 10{,}15 = 11{,}94\ м^3/кг.$$

Парциальные давлении газов в долях от атмосферного

$$p_{RO_2} = pr_{RO_2} = p\,\frac{v_{RO_2}}{v_г} = 1\cdot\frac{1{,}58}{11{,}94} = 0{,}132;$$

$$p_{H_2O} = pr_{H_2O} = p\,\frac{v_{H_2O}}{v_г} = 1\cdot\frac{1{,}336}{11{,}94} = 0{,}112.$$

Температура воздуха при холодном дутье $t_в=20$ °С. Удельная теплоемкость воздуха $c_в=1{,}3$ *кдж/м³·град* (из таблицы).

Энтальпии холодного воздуха

$$I_в = \alpha v^0 c_в t_в = 1{,}1\cdot 10{,}15\cdot 1{,}3\cdot 20 = 290\ кдж/кг.$$

Мазут перед сжиганием подогревается до $t_т=90$ °С.

Теплоемкость мазута $c_т=1{,}74+0{,}00251t_т=1{,}74+0{,}00251\cdot 90=1{,}966$ *кдж/кг·град*; энтальпия мазута $I_т=c_т t_т=1{,}966\cdot 90=177$ *кдж/кг*.

Предварительно принимаем калориметрическую температуру горения при работе на холодном воздухе $t_к=2\,050$ °С и соответственно этой температуре берем из таблицы значения теплоемкостей: $c_{CO_2}=2{,}43$ *кдж/м³·град*; $c_{N_2}=1{,}49$ *кдж/м³·град*; $c_{H_2O}=1{,}975$ *кдж/м³·град*; $c_в=1{,}505$ *кдж/м³·град*.

Калориметрическая температура при $t_в=20$ °С

$$t_к = \frac{Q^p_н + I_в + I_т}{v_{RO_2}c_{CO_2} + v^0_{N_2}c_{N_2} + v^0_{H_2O}c_{H_2O} + (\alpha - 1)\,v^0 c_в} = \frac{38{,}4\cdot 10^3 + 290 + 177}{1{,}58\cdot 2{,}43 + 8{,}02\cdot 1{,}49 + 1{,}366\cdot 1{,}975 + 0{,}1\cdot 10{,}15\cdot 1{,}505} = 2\,050\ °С.$$

Температура воздуха при горячем дутье $t_в=800$ °С. Удельная теплоемкость воздуха $c_в=1{,}385$ *кдж/м³·град*; энтальпия горячего воздуха $I_в=1{,}1\cdot 10{,}15\cdot 1{,}385\cdot 800=12\,400$ *кдж/кг*.

Калориметрическая температура при работе на горячем дутье принимается предварительно $t_к=2\,560$ °С. Соответствующие значения теплоемкостей: $c_{CO_2}=2{,}50$ *кдж/м³·град*; $c_{N_2}=1{,}52$ *кдж/м³·град*; $c_{H_2O}=2{,}08$ *кдж/м³·град*; $c_в=1{,}535$ *кдж/м³·град*.

Калориметрическая температура по расчету при $t_в=800$ °С составляет:

$$t_к = \frac{38{,}4\cdot 10^3 + 12\,400 + 177}{1{,}58\cdot 2{,}50 + 8{,}02\cdot 1{,}52 + 1{,}336\cdot 2{,}08 + 0{,}1\cdot 10{,}15\cdot 1{,}535} = 2\,560\ °С.$$

Эта температура будет мало отличаться от теоретической $t_т$.

Температура отходящих газов $t_{о.г}=1\,260$ °С. Температура материала в печи $t_м=1\,250$ °С. Безразмерные температуры при работе на холодном дутье:

газов

$$\theta_{о.г}=\frac{t_{о.г}+273}{t_г+273}=\frac{1\,260+273}{2\,050+273}=0{,}66;$$

нагреваемой поверхности

$$\theta_м=\frac{t_м+273}{t_г+273}=\frac{1\,250+273}{2\,050+273}=0{,}655.$$

Усредненное значение разности четвертых степеней безразмерных температур

$$\Delta_{2ср}=0{,}774\,\theta^2_{о.г}-\theta^4_м=0{,}774\cdot 0{,}66^2-0{,}655^4=0{,}154.$$

Степень черноты нагреваемого материала $\varepsilon_м=0{,}7$. Приведенная степень черноты печного пространства по графику (5-6) $\varepsilon_п=0{,}6$.

Условный коэффициент загрязнения лучевоспринимающей поверхности $\xi=0{,}62$. Тогда тепловая мощность печи (приближенно)

$$Q_х=C_0\varepsilon_м\varepsilon_п H_п\xi\left(\frac{T_г}{100}\right)^4\Delta_{2ср}=5{,}67\cdot 0{,}7\cdot 0{,}6\cdot 195\cdot 0{,}62\left(\frac{2\,050+273}{100}\right)^4 0{,}154=$$

$$=13{,}6\cdot 10^6\ вт=13{,}6\cdot 10^3\ квт.$$

Теоретическая производительность печи на холодном дутье (без простоев)

$$G_х=\frac{Q_х}{q_ш}=\frac{13{,}6\cdot 10^3}{1{,}55\cdot 10^3}=8{,}77\ кг/сек.$$

Здесь $q_ш=1{,}55\cdot 10^3$ *кдж/кг* — удельный расход тепла на расплавление и перегрев 1 *кг* шихты [Л. 19].

Безразмерные параметры при работе печи на горячем дутье:

газов $\theta_{о.г}=\dfrac{1\,260+273}{2\,560+273}=0{,}542;$

нагреваемой поверхности $\theta_м=\dfrac{1\,250+273}{2\,560+273}=0{,}538.$

Усредненное значение разности четвертых степеней безразмерных температур

$$\Delta_{2ср}=0{,}774\,\theta^2_{о.г}-\theta^4_м=0{,}774\cdot 0{,}542^2-0{,}538^4=0{,}143.$$

Тепловая мощность печи при работе на горячем дутье

$$Q'_ш=5{,}67\cdot 0{,}7\cdot 0{,}6\cdot 195\cdot 0{,}62\left(\frac{2\,560+273}{100}\right)^4 0{,}143=26{,}4\cdot 10^6\ вт=26{,}4\ Мвт.$$

Теоретическая производительность печи на горячем дутье

$$G_г=\frac{26{,}4\cdot 10^3}{1{,}55\cdot 10^3}=17{,}0\ кг/сек.$$

Съем продукции с 1 $м^2$ пода печи при холодном и горячем дутье соответственно

$$g_х=\frac{24\cdot 3\,600\cdot G_х}{1\,000\cdot F_0}=\frac{24\cdot 3\,600\cdot 8{,}77}{1\,000\cdot 195}=3{,}9\ т/сутки;$$

$$g_г=\frac{24\cdot 3\,600\cdot 17{,}0}{1\,000\cdot 195}=7{,}52\ т/сутки.$$

Из расчета видно, что производительность печи при подогреве воздуха резко увеличивается.

5-6. КРИТЕРИАЛЬНЫЙ РАСЧЕТ ВНЕШНЕГО ТЕПЛООБМЕНА В РАБОЧИХ КАМЕРАХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПЕЧЕЙ

В высокотемпературных камерных печах (сталеплавильных, нагревательных и т. д.) камерой сгорания служит все рабочее пространство печей или только часть его. Горение топлива происходит в непосредствен-

ной близости от изделий, и передача тепла осуществляется в основном лучеиспусканием, а роль конвективного теплообмена невелика (5—15%).

Составим уравнение внешнего теплообмена в высокотемпературной камерной печи в безразмерном виде, считая, что все тепло передается лучеиспусканием. Для этого на основе уравнения (5-7) составим уравнение теплового баланса:

$$C_0\varepsilon_в H_ж \xi \left[\left(\frac{T_г}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_м}{100}\right)^4\right]_{ср} = Bv_г\bar{c}_г(T_т - T_{о.г})\eta_к, \qquad (5\text{-}23)$$

где B — часовой расход топлива; $v_г$ — объем продуктов горения единицы количества топлива; $\eta_к$ — к. п. д. камеры сгорания; $\bar{c}_г$ — средняя объемная теплоемкость газов в пределах от теоретической температуры горения $t_т$ до $t_{о.г}$:

$$\bar{c}_г = \frac{c_т t_т - c_{о.г} t_{о.г}}{t_т - t_{о.г}}. \qquad (5\text{-}24)$$

Перепишем уравнение (5-23) в виде

$$\frac{Bv_г\bar{c}_г\eta_к}{C_0\varepsilon_в H_ж \xi} = \frac{T_г^4 - T_м^4}{T_т - T_{о.г}} \cdot 10^{-8} = \frac{\left[\left(\frac{T_г}{T_т}\right)^4 - \left(\frac{T_м}{T_т}\right)^4\right]_{ср} T_т^3 \cdot 10^{-8}}{1 - \frac{T_{о.г}}{T_т}} \qquad (5\text{-}25)$$

или

$$Bo = \frac{Bv_г\bar{c}_г\eta_к}{10C_0H_ж\left(\frac{T_т}{1000}\right)^3} = \frac{(\theta_г^4 - \theta_м^4)_{ср}}{1 - \theta_{о.г}}\varepsilon_в\xi, \qquad (5\text{-}26)$$

где Bo — топочный критерий (критерий Больцмана); $\theta_г = T_г/T_т$ — безразмерная температура газов; $\theta_м = T_м/T_т$ — безразмерная температура нагреваемой поверхности; $\theta_{о.г} = T_{о.г}/T_т$ — безразмерная температура отходящих газов.

Примем закон усреднения температур по формуле (5-13):

$$(\theta_г^4 - \theta_м^4)_{ср} = \sqrt{(1 - \theta_м^4)(\theta_{о.г}^4 - \theta_{м'}^4)}; \qquad (5\text{-}27)$$

Здесь индекс м′ относится к начальному состоянию материала, а м — конечному.

При холодной посадке материала $\theta_{м'} \approx 0$, следовательно,

$$(\theta_м^4 - \theta_м^4)_{ср} \approx \theta_{о.г}\sqrt{1 - \theta_м^4} = m\theta_{о.г}^2 \qquad (5\text{-}28)$$

и тогда безразмерное уравнение будет иметь вид:

$$Bo \approx \frac{\theta_{о.г}^2\sqrt{1 - \theta_м^4}}{1 - \theta_{о.г}}\varepsilon_в\xi. \qquad (5\text{-}29)$$

Определив расход топлива из теплового баланса рабочей камеры печи, можно, воспользовавшись уравнениями (5-26) и (5-29), найти температуру уходящих газов $t_{о.г}$ или другие входящие в них величины.

Для определения температуры газов на выходе из камеры печи $\theta_{о.г}$ мы имеем уравнение

$$\left(\frac{m}{Bo}\varepsilon_в\xi\right)\theta_{о.г}^2 + \theta_{о.г} - 1 = 0. \qquad (5\text{-}30)$$

Роль конвективного теплообмена учитывается коэффициентом $\beta_{конв}$, выраженным в долях от лучистого потока тепла.

Решая уравнение (5-30) относительно $\theta_{о.г}$, имеем:

$$\theta_{о.г} = \frac{-\text{Bo} + (\text{Bo}^2 + 4\,\text{Bo}\,\xi\varepsilon_в\beta_{конв}m)^{1/2}}{2\varepsilon_в\xi\beta_{конв}m}. \qquad (5\text{-}31)$$

Иногда приходится, зная $t_{о.г}$, определять лучевоспринимающую поверхность материала $H_л$, что можно сделать, пользуясь уравнением (5-26).

Доля общего тепла, переданного лучеиспусканием, может быть определена по формуле

$$\sigma = \frac{Q_{г.к.м}}{Q_{общ}} = \frac{Bv_г\bar{c}_г(T_т - T_{о.г})\eta_к}{Bv_г\bar{c}'_г T_т} \approx \left(1 - \frac{T_{о.г}}{T_т}\right)\eta_к. \qquad (5\text{-}32)$$

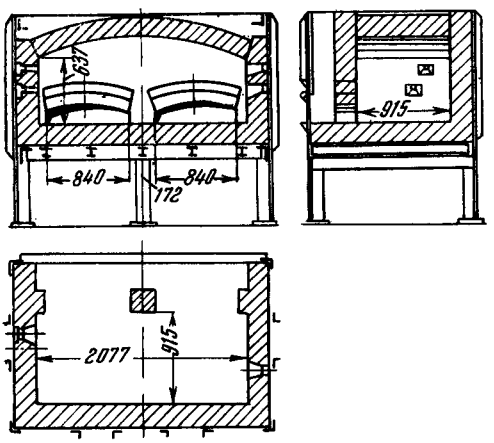


Рис. 5-7. Щелевая камериая кузнечиая печь.

Эта величина называется коэффициентом прямой отдачи тепла.

Пример 5-2. Для щелевой камерной печи, представленной на рис. 5-7, определить температуру отходящих газов. Температура металла: начальная $t_{м'}=20$ °С, конечная $t''_м=1\,250$ °С. Теоретическая температура горения $t_т=1\,900$ °С. Эффективная лучевоспринимающая поверхность металла $H_л=1{,}085$ *м*². Расход топлива (мазута) $B=18{,}8\times10^{-3}$ *кг/сек*. Количество продуктов сгорания при $\alpha=1{,}15$, $v_г=13{,}11$ *м*³/*кг* (по справочнику). К. п. д. камеры сгорания $\eta_к=0{,}92$.

Безразмерные температуры:

начальная металла $\theta_{м'} = \frac{T_{м'}}{T_т} = \frac{20+273}{1\,900+273} = 0{,}135$;

конечная металла $\theta_м = \frac{T_м}{T_т} = \frac{1\,250+273}{1\,900+273} = 0{,}7$;

отходящих газов $\theta_{о.г} = \frac{T_{о.г}}{T_т}$.

Задаемся предварительно температурой отходящих газов $t_{о.г}=1\,300$ °С, тогда средняя теплоемкость газов $c_г=1\,720$ *дж/кг · град*.

Приведенная степень черноты $\varepsilon_в=0{,}43$ (вычислено отдельно, см. [Л. 1]).

Определяем критерий Больцмана (по формуле 5-26):

$$\text{Bo} = \frac{18{,}18\cdot10^{-8}\cdot13{,}11\cdot1\,720\cdot0{,}92}{10\cdot5{,}67\cdot1{,}085\cdot2{,}173^3} = 0{,}69.$$

Условный коэффициент загрязнения лучевоспринимающей поверхности принят $\xi=0{,}70$. Соотношение лучистого и конвективного теплообмена $\beta_{конв}$ принято для данного типа печи равным 1,15; $m=(1-\theta^4_м)^{1/2}=(1-0{,}7^4)^{1/2}=0{,}87$.

По формуле (5-31) находим:

$$\theta_{о.г} = \frac{-0{,}69 + \sqrt{0{,}69^2 + 4\cdot0{,}69\cdot0{,}7\cdot0{,}43\cdot0{,}87\cdot1{,}15}}{2\cdot0{,}43\cdot0{,}7\cdot0{,}87\cdot1{,}15} = 0{,}74.$$

Температура отходящих газов равна:

$$t_{о.г}=\theta_{о.г}T_т - 273 = 0{,}74\cdot2\,173 - 273 = 1\,315\ °С,$$

что близко к ранее принятой.

Пирометрический коэффициент

$$\mu = (1-\theta_{о.г})\eta_к = (1-0{,}74)0{,}92 = 0{,}238.$$

Излучательная способность газа, найденная из расчетных графиков, относится к равномерно нагретому газу. Для практического использования этих графиков предполагают, что газы в печи (или на каком-либо участке печи) имеют постоянную среднюю температуру, одинаковую по всей толщине газового слоя, причем усреднение температур производится при помощи эмпирических формул, не отражающих аэродинами-

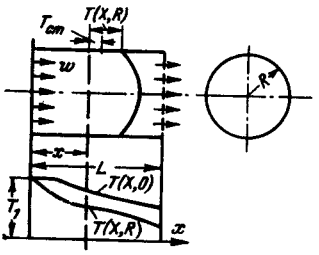


Рис. 5-8. График лучистого теплообмена между потоком излучающего газа и стенками камеры (канала).

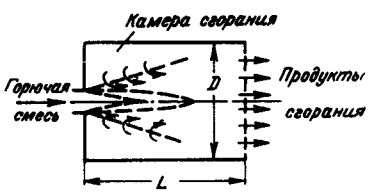


Рис. 5-9. Схемы камеры сгорания.

ки и оптические особенности рассматриваемого процесса. На самом деле температура газа в объеме различна: наиболее низка она у слоев газа, движущихся в непосредственной близости от нагреваемых в печи предметов, а чем дальше слои газа отстоят от поверхности этих предметов, тем выше их температура. На температурное поле оказывает большое влияние конвективный теплообмен. Большую роль играет перемешивание струй газа. Весь теплообмен такого типа может быть назван *радиационно-конвективным*. Ясно, что большую роль при этом теплообмене играет скорость газа и направленность его движения.

Представим себе, что в цилиндрическом канале движется излучающий газ с одинаковой по всему сечению скоростью w, температура газа в начальном сечении T_1, °К, в конечном сечении T_2, °К, температура же стенки одинакова $T_{ст}$ (рис. 5-8). С. Н. Шорин [Л. 18] показал, что в этом случае температура среды описывается критериальным уравнением вида

$$\frac{1-\frac{T_2}{T_1}}{1-\frac{T_{ст}}{T_1}}=\frac{1-\theta_2}{1-\theta_{ст}}=\Phi\left(\frac{wd}{\nu},\ kd,\ A_{ст},\ \frac{\sigma_0 T_1^3}{k\lambda},\ \frac{\nu}{a},\ \frac{T_{ст}}{T_1},\ \frac{L}{d}\right); \qquad (5\text{-}33)$$

здесь wd/ν — критерий Рейнольдса; ν/a — критерий Прандтля; $\sigma_0 T_1^3/k\lambda$ — критерий радиационно-кондуктивного теплообмена, где σ_0 — коэффициент излучения в формуле $E=\sigma_0 T^4$; kd — критерий Бугера, характеризующий оптическую плотность излучающего газа; $A_{ст}$ — поглощательная способность стенки; в условиях термодинамического равновесия поглощательная способность равна степени черноты собственного излучения ($A_{ст}=\varepsilon_{ст}$); L/d — протяженность канала в калибрах d; λ — коэффициент теплопроводности газов.

Если сравнить это уравнение с безразмерным уравнением конвективного теплообмена, то можно установить, что в него вошли дополнительные критерии: kd — критерий Бугера; $\sigma_0 T_1^3/k\lambda$ — критерий радиационно-кондуктивного теплообмена и $A_{ст}$ — поглощательная способность стенки.

Опыты показывают, что критерий $\sigma_0 T_1^3/k\lambda$ заметно не сказывается на теплообмене и его можно опустить — это упрощает уравнение (5-33).

Можно также рассмотреть наиболее сложный случай — теплообмен в камере сгорания газа, когда в камеру сгорания поступает смесь топлива и окислителя, сгорающая с образованием раскаленных продуктов горения и выделением химической энергии (рис. 5-9). С. Н. Шорин приводит в [Л. 18] уравнения, полученные из опыта с небольшой камерой сгорания, которые можно использовать для приближенных расчетов радиационно-конвективного теплообмена при заданной температуре охлаждающей среды (стенок камеры).

5-7. НАПРАВЛЕННЫЙ КОСВЕННЫЙ РАДИАЦИОННЫЙ ТЕПЛООБМЕН

Косвенный направленный теплообмен является новым методом интенсификации внешнего радиационно-конвективного теплообмена в нагревательных печах. Схема печи, в которой используется указанный принцип, дана на рис. 5-10. На своде печи установлены высокоэффективные плоскопламенные радиационные горелки. Факел и продукты горения движутся плоскими струями с большей скоростью вдоль поверхности

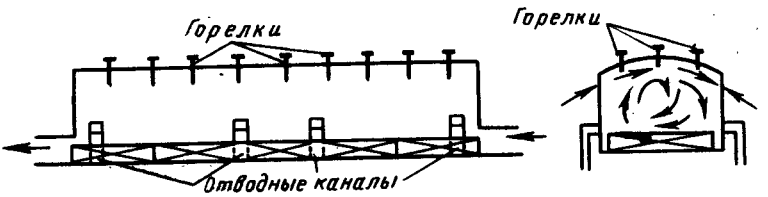


Рис. 5-10. Схема проходной печи для нагрева металлических заготовок из цветных металлов (с косвенно направленным радиационным нагревом).

свода. Тем самым создаются благоприятные условия для интенсивной конвективной теплоотдачи от греющих газов к кладке свода. В то же время хороший контакт факела с высоконагретой поверхностью обеспечивает быстроту и полноту горения топлива. Тепло, воспринятое кладкой свода, практически передается одним излучением к поверхности нагреваемого материала.

Можно пренебречь тепловыми потерями во внешнюю среду и считать, что прямая конвективная теплоотдача от факела к нагреваемой поверхности отсутствует. Тогда результирующее тепло, полученное материалом при стационарном состоянии, составит:

$$Q_м = \varepsilon_м H_л \left\{ \left[C_{пр} \left(\frac{T_{кл}}{100} \right)^4 - C_0 \left(\frac{T_м}{100} \right)^4 \right] - \varepsilon''_г \left[C_{пр} \left(\frac{T_{кл}}{100} \right)^4 - \right.\right.$$

$$\left.\left. - C_0 \left(\frac{T''_г}{100} \right)^4 \right] + \varepsilon''_г (1 - \varepsilon''_г) \left[C_0 \left(\frac{T'_г}{100} \right)^4 - C_{пр} \left(\frac{T_{кл}}{100} \right)^4 \right] \right\}, \qquad (5\text{-}34)$$

где $C_{пр}$ — приведенный коэффициент лучеиспускания, определяемый по формуле

$$C_{пр} = \frac{C_0 - \dfrac{\alpha_к (T'_г - T_{кл})(1 - \varepsilon_{кл})}{\varepsilon_{кл} \left(\dfrac{T_{кл}}{100} \right)^4}}{1 - \dfrac{1 - \varepsilon_{кл}}{\varepsilon_{кл}} (1 - \varphi_{к.м})(1 - \varepsilon'_г)(1 - \varepsilon''_г)},$$

$\varphi_{к.м}$ — угловой коэффициент от кладки на нагреваемую поверхность; $\varepsilon_м$ — степень черноты нагреваемого материала; $T'_г$ и $T''_г$ — абсолютные температуры газов в зоне горения (собственно горящий факел) и зоне теплообмена (слой газов между факелом и нагреваемой поверхностью); $\varepsilon'_г$ и $\varepsilon''_г$ — соответствующие степени черноты газов; $T_{кл}$ и $T_м$ — температуры кладки и материала; $\alpha_к$ — коэффициент теплоотдачи конвекцией от факела к кладке.

5-8. ВНЕШНИЙ ТЕПЛООБМЕН В ПЛОТНОМ (ФИЛЬТРУЮЩЕМ), ПАДАЮЩЕМ И КИПЯЩЕМ СЛОЕ МАТЕРИАЛА

Нагрев кусков в слое по З. Ф. Чуханову можно рассматривать как внешнюю задачу только при значениях критерия Био $Bi < 0{,}6 \div 1{,}0$. Напомним, что критерий $Bi = \alpha_к d_э / 2\lambda_м$, где $d_э$ — эквивалентный диаметр кусков (мож-

но считать $d_э$ примерно на 25% больше размера кусков); $\lambda_м$ — коэффициент теплопроводности материала; $\alpha_к$ — коэффициент конвективного теплообмена.

При продувании неподвижного (фильтрующего) слоя материала излучающими газами теплообмен идет преимущественно конвекцией, так как из-за малых толщин слоя газов в зазорах роль излучения незначительна. Ввиду переменного сечения зазоров вдоль хода газов скорость газов будет пульсирующей, что способствует турбулизации потока. Коэффициент теплоотдачи конвекции $\alpha_к$ по В. Н. Тимофееву определяется по следующим формулам:

$$Nu_{сл}=0{,}106Re_{сл} \text{ (при } Re_{сл}<200); \tag{5-35}$$

$$Nu_{сл}=0{,}61Re_{сл} \text{ (при } Re_{сл}>200); \tag{5-36}$$

здесь $Nu_{сл}=\alpha_к d_э/\lambda_г$ — критерий Нуссельта; $Re_{сл}=wd_э/\nu_г$ — критерий Рейнольдса; w — скорость газов, отнесенная к пустой шахте; $\lambda_г$, $\nu_г$ — коэффициенты теплопроводности и кинематической вязкости газа.

Поверхность кусков $F_м$ определяется по формуле

$$\frac{F_м}{V_м}=\frac{6(1-f)}{d},\ м^2/м^3, \tag{5-37}$$

где $V_м$ — объем слоя; f — порозность слоя в долях от единицы.

Чем меньше критерий Био, тем тоньше в термическом отношении шаровые частицы насыпного материала, и при значениях $Bi<0{,}1\div0{,}25$ мы имеем дело с термически тонкими частицами (а не только с геометрически тонкими), все точки материала имеют одинаковую температуру и процесс нагревания называют квазистационарным. Этот случай имеет место в регенеративных дробепоточных воздухоподогревателях или других конструкциях, когда в качестве насадки используются шарики (дробь). При противоточно продуваемом и движущемся плотном слое теплообмен описывается уравнениями.

$$Nu_{сл}=0{,}014Re_{сл}Pr^{0{,}33} \text{ (при } Re_{сл}<200); \tag{5-38}$$

$$Nu_{сл}=0{,}056\,Re_{сл}^{0{,}87}\,Pr^{0{,}33} \text{ (при } Re_{сл}=200\div700 \text{ и } Pr=0{,}68\div1{,}1). \tag{5-39}$$

Сравнивая формулы (5-35) и (5-38), можно определить поправочные коэффициенты к формулам В. Н. Тимофеева:

$$\left.\begin{aligned}\psi&=0{,}132\,Pr^{0{,}33} \quad (\text{при } Re_{сл}<200);\\ \psi&=0{,}092\,Re_{сл}^{0{,}2}\,Pr^{0{,}33} \quad (\text{при } Re_{сл}>200).\end{aligned}\right\} \tag{5-40}$$

Разница объясняется худшим газораспределением в подвижном слое, следовательно, теплоотдача в подвижном слое протекает слабее и часто для улучшения всю массу опускающегося слоя делят на секции.

При поперечно продуваемом слое для $Re_{сл}=140\div1\,000$, $W_т/W=0\div1$ ($W_т$ и W — водяные эквиваленты насадки и газов), $t'=280\div830$ °С и $t''=210\div600$ °С теплообмен может быть рассчитан по формуле [Л. 24].

$$Nu_{сл}=0{,}055\,Re_{сл}. \tag{5-41}$$

Внешний теплообмен в потоке газовзвеси (в падающем слое).

Теплообмен в потоке газовзвеси идет путем конвективной и радиационной теплоотдачи от газов к частицам и теплопроводности внутри частиц. Более нагретые частицы отдают тепло газовому потоку или менее нагретым частицам при их соприкосновении. Большое значение имеют скорость потока, концентрация частиц в потоке газовзвеси и размеры частиц.

Теплообмен рассчитывается в зависимости от аэродинамического режима газовзвеси по формулам [Л. 24]:

$$Nu_т = 0{,}194\,Re_т^{0{,}79} \quad (\text{при } 30 < Re_т < 480); \tag{5-42}$$

$$Nu_т = 0{,}316\,Re_т^{0{,}8} \quad (\text{при } Re_т = 40 \div 500). \tag{5-43}$$

Здесь

$$Nu_т = \frac{\alpha d_т}{\lambda} \text{ и } Re_т = w_{от}\frac{d_т}{\nu}. \tag{5-44}$$

В формулах (5-42)—(5-44) при определении критерия $Re_т$ размер частицы $d_т$ берется по эквивалентному диаметру с поправкой на геометрическую форму, а скорость потока относительная:

при противотоке
$$\downarrow \uparrow w_в = w + w_т;\ w_т = w_в - w;$$
при восходящем потоке
$$\uparrow \uparrow w_в = w - w_т;\ w_т = w - w_в; \tag{5-45}$$
при нисходящем потоке
$$\downarrow \downarrow w - w_т = -w_в;\ w_т = w + w_в;$$

здесь w — абсолютная скорость потока; $w_в$ — взвешивающая скорость потока; $w_т$ — скорость твердой частицы. Движение частицы можно рассматривать как равномерное, поэтому путь, пройденный частицами, будет:

$$L = (w_в - w)(\tau_т - \tau_р) = w_т\tau. \tag{5-46}$$

Внешний теплообмен в кипящем псевдоожиженном слое). Теплообмен в кипящем слое более интенсивен, чем в неподвижном. Интенсификация теплообмена здесь обусловлена сложным колебательно-вращательным движением твердых частиц и высокой степенью турбулизации газового потока, которые в общем итоге способствуют разрушению пограничного слоя на твердых поверхностях. Этому способствует также столкновение твердых частиц между собой и со стенками теплообменного аппарата. Расчетная формула для теплообмена между газообразным теплоносителем и твердыми частицами в кипящем слое дана в [Л. 11] в следующем виде:

$$Nu = 0{,}316\,Re_{сл}^{0{,}8} \quad (\text{при } Re_{сл} = 40 \div 500); \tag{5-47}$$

здесь

$$Re_{сл} = \frac{w d_э}{\nu},$$

где w — скорость, отнесенная к площади решетки, на которой расположен слой; $d_э$ — эквивалентный диаметр твердой частицы.

Температурный напор в слое находится по среднеинтегральным значениям температур частиц и газа:

$$\Delta t = \frac{1}{H}\int_0^H [t_т(h) - t_г(h)]\,dh = t_{mт} - t_{mг}.$$

Подробнее об определении Δt сказано в [Л. 11].

Высокая интенсивность теплообмена в кипящем слое может быть использована для быстрого нагрева или охлаждения погруженных в него твердых тел (например, нагрев или охлаждение стальных изделий при термообработке). В этом случае кипящий слой используется как

промежуточный теплоноситель. Максимальная интенсивность теплообмена между газообразным теплоносителем и тепловоспринимающей поверхностью достигается при оптимальном значении критерия Рейнольдса

$$Re_{опт}=0{,}121Ar^{0,5}, \tag{5-48}$$

где $Ar=\frac{gd_э^3}{\nu^2}\frac{\rho_т-\rho}{\rho}$ — критерий Архимеда; $\rho_т$ — плотность вещества частиц.

Для вычисления максимальных коэффициентов теплоотдачи при $Ar=30\div 2\cdot 10^5$ можно пользоваться формулой

$$Nu_{макс}=0{,}86Ar^{0,2}. \tag{5-49}$$

5-9. ВНУТРЕННИЙ ТЕПЛООБМЕН

Тепло, получаемое внешней поверхностью нагреваемых изделий, постепенно проникает внутрь материала вследствие его теплопроводности и разности температур поверхности и внутренних слоев материала. Распространение тепла в твердых телах при их нагреве или охлаждении представляет собой неустановившийся (нестационарный) процесс и описывается для твердых тел уравнением Фурье. Для простоты напишем это уравнение для случая нагрева пластины, когда температурное поле определяется одной координатой x:

$$\frac{\partial t_м}{\partial \tau}=a\frac{\partial^2 t_м}{\partial x^2}, \tag{5-50}$$

где $a=\lambda/c\rho$ — коэффициент температуропроводности; c — средняя теплоемкость материала; λ — коэффициент теплопроводности; $t_м$ — температура тела в точке x в данный момент.

Написанное уравнение представляет собой закон сохранения энергии для элемента пластины, имеющего толщину dx; оно выводится из теплового баланса выделенного элемента (количество тепла, поступающего за время $d\tau$ в элемент, равно сумме количества тепла, выходящего из элемента, и количества тепла, пошедшего на нагрев элемента).

Тепловой поток для пластины определяется по основному закону теплопроводности:

$$q=-\lambda\frac{\partial t}{\partial x}. \tag{5-51}$$

Внутренний теплообмен зависит от теплового состояния наружной поверхности изделия (от граничных условий), от физических свойств материала и от размеров изделий.

Нагрев изделий при изменении температуры внешней поверхности по закону $t_м^{пов}=\theta\tau$.

В этом случае, имеющем большое практическое значение, температура поверхности изделия повышается с постоянной скоростью θ *град/ч*. По истечении некоторого времени после начала нагрева устанавливается постоянная скорость повышения температуры тела во всех точках θ *град/ч*. Поле температур тела при таком регулярном режиме остается во времени подобным самому себе. Для этого режима дифференциальное уравнение (5-50) решается наиболее просто [Л. 16]:

$$t_м=\theta\tau+\frac{1}{2}\frac{\theta x^2}{a}+C, \tag{5-52}$$

где C — постоянная величина.

Из этой формулы видно, что температура всех точек тела растет с постоянной скоростью, а распределение температур по сечению пластины носит параболический характер. Перепад температур между поверхностью изделия и его центром будет постоянным, не зависящим от времени; для пластины толщиной $2s$ он составляет:

$$\Delta t_{\text{м}} = t_{\text{м}}^{\text{пов}} - t_{\text{м}}^{\text{цен}} = \frac{1}{2}\frac{\theta s^2}{a} = \text{const}. \qquad (5\text{-}53)$$

Для цилиндра величина $\Delta t_{\text{м}}$ выражается аналогичной формулой:

$$\Delta t_{\text{м}} = \frac{1}{4}\frac{\theta R^2}{a}. \qquad (5\text{-}54)$$

Тепловой поток, проходящий через поверхность тела, определяется по формулам: для пластины толщиной $2s$

$$q_{\text{м}}^{\text{пов}} = \frac{2\lambda\Delta t_{\text{м}}}{s}; \qquad (5\text{-}55)$$

для цилиндра

$$q_{\text{м}}^{\text{пов}} = \frac{2\lambda\Delta t_{\text{м}}}{R}. \qquad (5\text{-}56)$$

Отсюда видно, что тепловой поток в данном случае является величиной постоянной.

Постоянный перепад температур между поверхностью и серединой устанавливается сравнительно быстро.

Время нагрева пластины толщиной $2s$ можно найти из уравнения (5-53), приняв во внимание, что

$$t_{\text{м}}^{\text{пов}} - t_{\text{м}}^{\text{пов}^0} = \theta\tau,$$

где $t_{\text{м}}^{\text{пов}} - t_{\text{м}}^{\text{пов}^0}$ — прирост температуры на поверхности за время τ, *сек.*

Для пластины толщиной $2s$ при двустороннем симметричном нагреве время нагрева определяется по формуле, рекомендуемой Н. Ю. Тайцем, для расчета нагрева металла в методических печах:

$$\tau = \frac{0{,}5s^2}{a\Delta t_{\text{м}}}\left(t_{\text{м}}^{\text{пов}} - t_{\text{м}}^{\text{пов}^0}\right). \qquad (5\text{-}57)$$

В общем случае для тел различной формы

$$\tau = \frac{k_{\Phi}s^2}{a\Delta t_{\text{м}}}\left(t_{\text{м}}^{\text{пов}} - t_{\text{м}}^{\text{пов}^0}\right), \qquad (5\text{-}58)$$

где k_{Φ} — коэффициент формы, имеющий следующие значения:

Бесконечно большая пластина	0,500
Прямоугольная призма бесконечной длины с отношением сторон:	
1,0	0,295
1,25	0,355
1,50	0,410
1,75	0,440
2,0	0,450
Цилиндр с отношением высоты к диаметру:	
1,0	0,201
1,25	0,234
1,50	0,245
∞	0,250
Куб	0,221
Шар	0,167

5-10. РАСЧЕТ НАГРЕВА ИЗДЕЛИЙ В ПЕЧИ С ПОСТОЯННОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ (ПРИ $T_п$=const)

Нагрев изделий в печи с постоянной температурой имеет важное практическое значение. Примерно постоянная температура имеет место во многих камерных печах при их непрерывной работе. Кроме того, в печах с переменной температурой ($T_п$=var) кривую температур можно разбить на ряд участков и на каждом из них температуру рассматривать как постоянную; таким образом, задача и в этом случае может быть сведена к случаю $T_п$=const.

В высокотемпературных печах, как сказано, почти все тепло передается лучеиспусканием от печного пространства, и тепловой поток, падающий на внешнюю поверхность материала, имеющую температуру $T^{пов}_м$, может быть найден из выражения

$$q^{пов}_м = C_п\left[\left(\frac{T_п}{100}\right)^4 - \left(\frac{T^{пов}_м}{100}\right)^4\right]. \qquad (5\text{-}59)$$

Конвективная теплоотдача учитывается соответственным увеличением приведенного коэффициента лучеиспускания $C_п$.

С другой стороны, тепловой поток может быть выражен согласно основному закону теплопроводности формулой

$$q^{пов}_м = -\lambda\frac{\partial T^{пов}_м}{\partial x}, \qquad (5\text{-}60)$$

тогда

$$C_п\left[\left(\frac{T_п}{100}\right)^4 - \left(\frac{T^{пов}_м}{100}\right)^4\right] = -\lambda\frac{\partial T^{пов}_м}{\partial x}. \qquad (5\text{-}61)$$

Разберем случай, когда нагрев производится в печи с постоянной температурой $T_п$=const.

Абсолютную температуру тела обозначим $T_м$, абсолютную температуру материала до нагрева $T^0_м$, температуру поверхности тела $T^{пов}_м$ и температуру материала в центре тела $T^{цен}_м$.

Представим уравнение (5-61) для случая нагрева тела, имеющего форму бесконечной пластины толщиной $2s$, в критериальной форме:

$$\frac{C_п s}{100\lambda}\left(\frac{T_п}{100}\right)^3\left[1 - \left(\frac{T^{пов}_м}{T_п}\right)^4\right] = -\frac{\partial\left(\frac{T^{пов}_м}{T_п}\right)}{\partial\left(\frac{x}{s}\right)}. \qquad (5\text{-}62)$$

Величина

$$И = \frac{C_п s}{100\lambda}\left(\frac{T_п}{100}\right)^3 = 10\frac{C_п s}{\lambda}\left(\frac{T_п}{1\,000}\right)^3, \qquad (5\text{-}63)$$

впервые примененная Г. П. Иванцовым [Л. 16], является безразмерным критерием. Иногда ее называют критерием Старка и обозначают Sk.

Уравнение Фурье также можно представить в критериальной форме. Для этого разделим числитель обеих частей уравнения (5-50) на $T_п$, а знаменатель на s^2, внеся эти постоянные под знаки дифференциалов:

$$\frac{\partial\left(\frac{T_м}{T_п}\right)}{\partial\left(\frac{a\tau}{s^2}\right)} = \frac{\partial^2\left(\frac{T_м}{T_п}\right)}{\partial\left(\frac{x}{s}\right)^2} \text{ или } \frac{\partial\left(\frac{T_м}{T_п}\right)}{\partial(Fo)} = \frac{\partial^2\left(\frac{T_м}{T_п}\right)}{\partial\left(\frac{x}{s_{ц}}\right)^2}, \qquad (5\text{-}64)$$

где $Fo=a\tau/s^2$ — критерий Фурье для пластины; $T_м/T_п$ — безразмерная температура материала на расстоянии x/s; x/s — безразмерная координата толщины пластины.

Решение уравнений (5-62) и (5-64) может быть представлено в виде зависимости

$$\frac{T_м}{T_п}=f\left(\frac{x}{s};\ Fo;\ И;\ \frac{T^0_м}{T_п}\right), \tag{5-65}$$

где критерий Фурье Fo выражается формулами: для пластины с толщиной $2s$

$$Fo=\frac{a\tau}{s^2}; \tag{5-66}$$

для цилиндра с радиусом R

$$Fo=\frac{a\tau}{R^2}; \tag{5-67}$$

$T^0_м$ — начальная температура тела, °К.

Д. В. Будриным показано, что для пластины толщиной $2s$ критерий Фурье имеет значение

$$Fo=\frac{\psi_2-\psi_1}{И}=\frac{a\tau}{s^2}, \tag{5-68}$$

где ψ_1 — функция, зависящая от относительной температуры тела до нагрева (средней по массе) $y_1=T^0_м/T_п$ и от критерия И; ψ_2 — функция относительной температуры (средней по массе) в конце нагрева $y_2=T_м/T_п$, а также от критерия И.

Значения функций ψ_1 и ψ_2 определяются по вспомогательным графикам, приведенным на рис. 5-11. Для длинного цилиндра критерий Фурье может быть найден по формуле

$$Fo=\frac{\psi_2-\psi_1}{2И}\frac{a\tau}{R^2}. \tag{5-69}$$

В случае нагрева длинной квадратной призмы ее можно заменить эквивалентным цилиндром, имеющим диаметр на 9—10% более стороны квадрата.

Пример 5-3. Определить время нагрева заготовки из низколегированной стали диаметром 500 *мм*, помещенной в печь с постоянной температурой $t_п=850$ °С ($T_п=1\,123$ °К). Средняя по массе температура металла в конце нагрева $t_м=727$ °С ($T_м=1\,000$ °К).

Начальная температура стали $t^0_м=20$ °С ($T^0_м=293$ °К). Физические константы стали: $\lambda=35$ *вт/(м·град)*; $c=0{,}71$ *кдж/кг·град*; $\rho=7\,860$ *кг/м³*; $a=0{,}0225$ *м²·ч*. Приведенный коэффициент лучеиспускания $C_п=3{,}5$ *вт/(м²·°К⁴)*. Определяем критерий И:

$$И=\frac{10C_пR}{\lambda}\left(\frac{T_п}{1\,000}\right)^3=\frac{10\cdot3{,}5\cdot0{,}25}{35}1{,}123^3=0{,}35.$$

Начальная относительная температура металла

$$y_1=\frac{T^0_м}{T_п}=\frac{293}{1\,123}\approx0{,}26.$$

Конечная относительная температура металла

$$y_2=\frac{T_м}{T_п}=\frac{1\,000}{1\,123}\approx0{,}89.$$

По графику рис. 5-11, *б* находим значение функций:

$$\psi_1 = 0{,}24 \text{ и } \psi_2 = 1{,}23.$$

Критерий Фурье по формуле (5-69)

$$\text{Fo} = \frac{a\tau}{R^2} = \frac{\psi_2 - \psi_1}{2И} = \frac{1{,}23 - 0{,}24}{2 \cdot 0{,}35} \approx 1{,}41.$$

Время нагрева будет:

$$\tau = \frac{\text{Fo}\, R^2}{a} = \frac{1{,}41 \cdot 0{,}25^2}{0{,}0225} = 3{,}92 \text{ ч}.$$

Значения наружной температуры заготовки и температуры в центре определим приближенно.

Тепловой поток на поверхности заготовки в конце нагрева будет:

$$q_м^{пов} = C_п \left[\left(\frac{T_п}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_м^{пов}}{100} \right)^4 \right] = \frac{2\Delta t_м \lambda}{R}. \qquad (5\text{-}70)$$

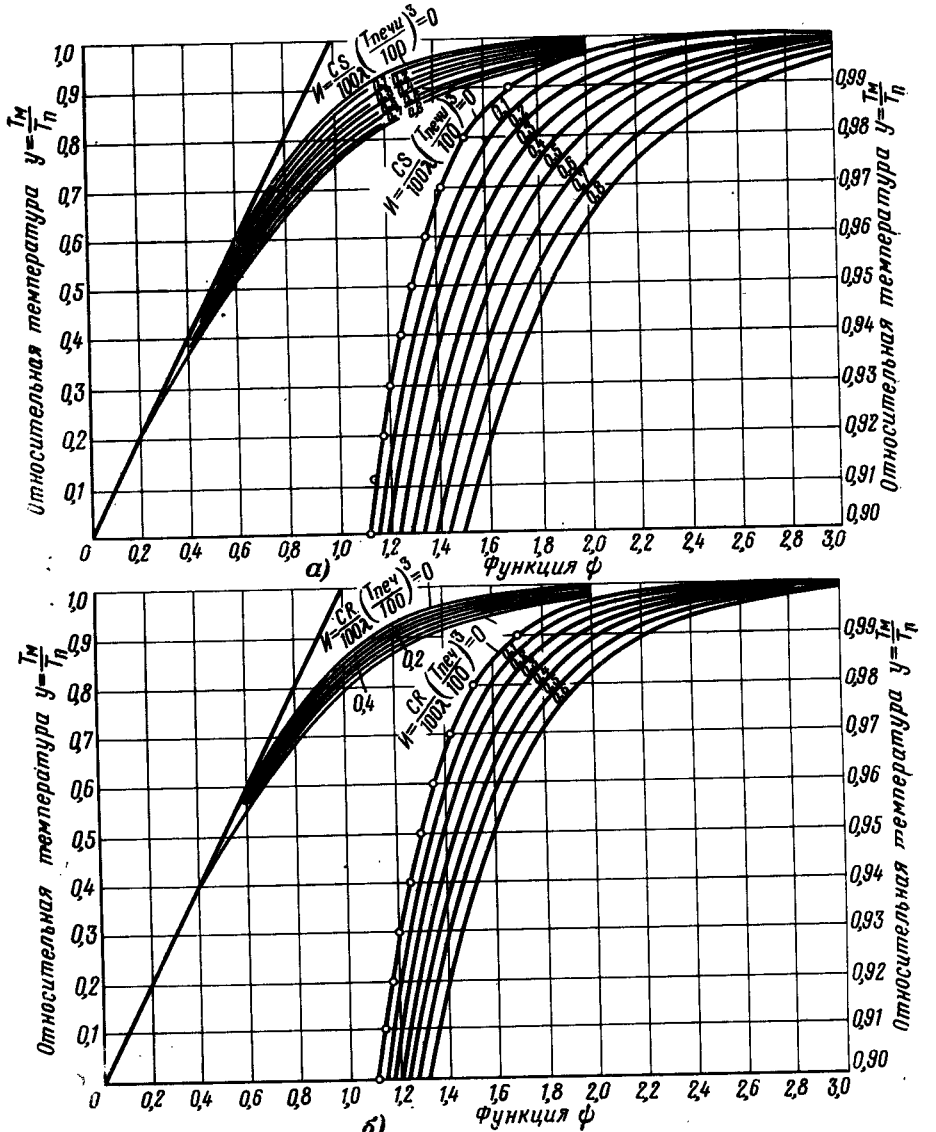


Рис. 5-11. Вспомогательные графики для расчета нагрева пластины (по Д. В. Будрину).

а — нагрев пластины; *б* — нагрев цилиндра.

Средняя температура металла по массе определяется по формуле

$$t_м = t_м^{цен} + 0{,}33\Delta t_м. \qquad (5\text{-}71)$$

Задаваясь температурой на поверхности заготовки в конце нагрева $t_м^{пов} = 780$ °С (1 053 °К), найдем, что

$$q_м^{пов} = 3{,}5\,[11{,}23^4 - 10{,}54^4] = 21\,200\ вт/м^2.$$

Тогда температурный перепад между поверхностью и центром заготовки

$$\Delta t_м = \frac{q_м^{пов} R}{2\lambda} = \frac{21\,200 \cdot 0{,}25}{2 \cdot 35} = 76\ °С.$$

Температура металла в центре заготовки

$$t_м^{цен} = 780 - 76 = 704\ °С.$$

Средняя температура по массе металла

$$t_м = 704 + 0{,}33 \cdot 76 \approx 730\ °С,$$

что близко подходит к заданному значению ее.

Следовательно, температуры на поверхности и в центре заготовки в конце нагрева можно приблизительно считать $t_м^{пов} = 780$ °С и $t_м^{цен} = 704$ °С.

Если задана температура поверхности металла или его центра, то расчет ведут в обратном порядке.

Описанный метод расчета относится к случаю равномерного (симметричного) нагрева тел. Пластина, в частности, нагревается симметрично с двух сторон. Такой нагрев, однако, редко бывает на практике. При неравномерном нагреве вместо размера s подставляют расчетную величину:

$$s = \mu x,$$

где μ — коэффициент неравномерности, равный отношению потоков сверху или снизу к их сумме; x — действительная толщина пластины.

В случаях, если нагревается не одно цилиндрическое тело, а несколько тел, расположенных на некотором одинаковом расстоянии друг от друга, следует в уравнение теплового потока (5-61) ввести множитель φ, представляющий собой угловой коэффициент (коэффициент облученности), который показывает отношение лучевоспринимающей поверхности тел к их общей боковой поверхности $\varphi = H_л/F$. Критерий И определяется в этом случае по формуле

$$И = \frac{C_п \varphi s}{100\lambda}\left(\frac{T_п}{100}\right)^3. \qquad (5\text{-}72)$$

Если при нагреве изделий тепло передается преимущественно посредством конвекции, уравнение (5-60) целесообразно заменить следующим уравнением:

$$\alpha\,(t_п - t_м^{пов}) = -\lambda \frac{\partial t_м^{пов}}{\partial x}, \qquad (5\text{-}73)$$

где α — коэффициент теплоотдачи от печного пространства к наружной поверхности изделий.

Этот коэффициент учитывает теплоотдачу конвекцией, а также лучеиспусканием от газов и от кладки и рассчитывается по формуле

$$\alpha = \frac{Q_{т.к.м}}{t_п - t_м^{пов}}. \qquad (5\text{-}74)$$

Коэффициент теплоотдачи α складывается из коэффициентов теплоотдачи конвекцией $\alpha_к$ и лучеиспусканием $\alpha_л$:

$$\alpha = \alpha_к + \alpha_л. \tag{5-75}$$

Решение уравнений (5-73) и (5-50) имеет вид:

$$\frac{t_п - t_м}{t_п - t_м^0} = \varphi\left(\text{Fo};\ \text{Bi};\ \frac{x}{s}\right), \tag{5-76}$$

где Fo — критерий Фурье для изделия; Bi — критерий Био, имеющий значение: для пластины с толщиной $2s$

$$\text{Bi} = \frac{\alpha_к s}{\lambda_м}; \tag{5-77}$$

для цилиндра

$$\text{Bi} = \frac{\alpha_к R}{\lambda_м}. \tag{5-77'}$$

При решении задач по нагреву в данном случае целесообразно пользоваться графиками, разработанными Д. В. Будриным [1].

В рассматриваемом способе расчета приходится вычислять коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием от газов и от кладки печи, что связано часто со значительными трудностями. Поэтому иногда пользуются эмпирическими формулами.

5-11. РАСЧЕТ НАГРЕВА МЕТАЛЛА В ПЕЧИ С ПЕРЕМЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ

Во многих промышленных печах температура газов по мере движения в рабочем пространстве меняется (рис. 5-12). Одновременно меняется и температура нагреваемого материала, движущегося обычно противоточно с потоком газов. Аналитическое решение задачи радиационно-конвективного нагрева при указанных условиях рассмотрим на примере нагрева термически тонких изделий, движущихся непрерывным потоком (например, тонкой стальной ленты [Л. 25]). Вследствие небольшой толщины изделий перепад температур по ее сечению ничтожен и определяющим является внешний теплообмен. Как известно из теории нестационарной теплопередачи, этот случай будет иметь место, когда

$$\frac{\text{Bi}}{0{,}25} + \frac{\text{И}}{0{,}1} \leqslant 1. \tag{5-78}$$

Дифференциальное уравнение радиационно-конвективного теплообмена для участка печи с бесконечно малой длиной dl, на которой температуры газов и ленты изменяются ничтожно мало, имеет следующий вид:

$$10^{-8} C_п (T_г^4 - T_м^4)\, dH_л + \alpha_к (T_г - T_м)\, dH_л = W_м dT_м. \tag{5-79}$$

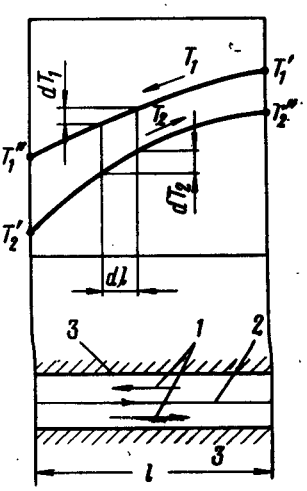


Рис. 5-12. Схема нагрева «тонкнх» изделий в печи с протнвоточным движением.

1 и *2* — потоки газов и «тонкого» материала; *3* — абсолютная теплоизоляция.

[1] Казанцев Е. И. Промышленные печи. М., «Металлургия», 1964 и другие пособия.

где $dH_л = dlB$ — поверхность теплообмена участка; B — ширина материала, движущегося сплошным потоком (ленты); $W_м$ — водяной эквивалент материала.

Обозначим через $m = W_г/W_м$ отношение водяных эквивалентов газового потока и материала, а через $T_с = T_г - mT_м$ некоторый постоянный температурный параметр. Тогда величина отнесенной к параметру $T_с$ безразмерной температуры материала составит:

$$\theta_с = \frac{T_м}{T_с}. \qquad (5\text{-}80)$$

После подстановок уравнение (5-79) получается в безразмерном виде:

$$И_с[(1 + m\theta_с)^4 - \theta_с^4] - Bi[(1 + m\theta_с) - \theta_с] = \frac{1}{d\,Fo}\, d\theta_с; \qquad (5\text{-}81)$$

здесь $И_с$ — радиационный критерий, отнесенный к $T_с$;

$$d\,Fo = \frac{a}{s^2}\, d\tau = \frac{a}{s^2}\,\frac{dl}{w_м} = \frac{a}{s^2}\,\frac{dH_л}{Bw_м},$$

где $d\tau$ — время нагревания ленты на участке; $w_м$ — скорость движения ленты материала.

Решение задачи сводится к интегрированию уравнения (5-81) по Fo и $\theta_с$.

В общем случае после разделения переменных получим:

$$И_с \int_{Fo'}^{Fo''} d\,Fo = \int_{\theta'_с}^{\theta''_с} \frac{d\theta_с}{(m^4-1)\,\theta_с^4 + 4m^3\theta_с^3 + 6m^2\theta_с^2 + \left[(m-1)\frac{Bi}{И_с} + 4m\right]\theta_с + \left(1 + \frac{Bi}{И_с}\right)}.$$

Окончательное решение имеет следующий вид:

$$И_с[Fo'' - Fo'] = Ф'' - Ф', \qquad (5\text{-}82)$$

где величина Ф является функцией постоянных значений комплексов m и $Bi/И_с$, а также переменной $\theta_с$.

Соотношение величин m и $T_с$ характеризуют режимы теплообмена и характер температурных графиков. Так, при $m>0$ и $T_с/T_1<1$ будет противоток, а при $T_с/T_1>1$ — прямоток, причем для каждого случая можно выделить три характерные разновидности режимов изменения температур теплообменивающихся тел. Это показано на рис. 5-13. При $m=0$ и $T_с/T_1=1$ имеет место камерный режим теплообмена.

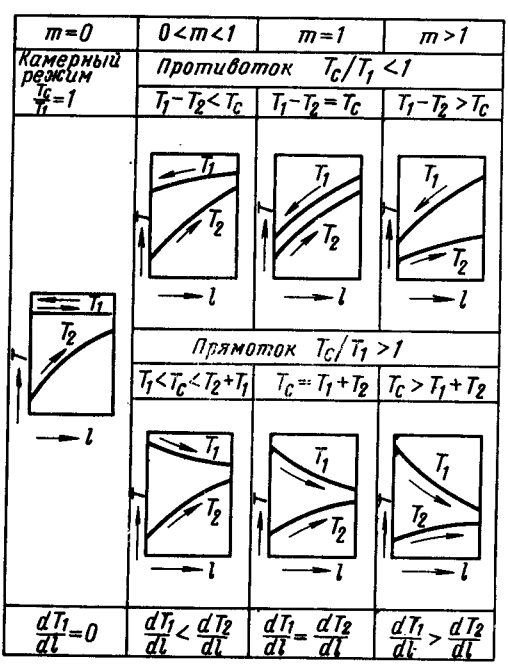


Рис. 5-13. Влияние параметров $T_м$ и m на температурные режимы теплообмена при противо- и прямоточном движении материалов.

Комплекс $Bi/И_с$ характеризует соотношение между критериями Bi и И, характеризующими роль излучения и конвекции. При $Bi/И_с=0$ ($\alpha_к \to 0$) происходит только излучение; возрастание $Bi/И_с$ свидетельствует об увеличении доли конвективной теплопередачи. При $Bi/И_с=\infty$ ($C_{пр} \to 0$) будет иметь место только конвективный теплообмен.

Практически при проведении расчетов печь делится на несколько таких участков, на каждом из которых расчетная температура газов может быть принята постоянной ($T_г=\text{const}$). При этом условии продолжительность радиационно-конвективного нагрева ленты

$$\tau = \frac{s}{k_ф}\,\frac{c_м}{\alpha_к}\,\frac{Bi}{И}\,(Ф'' - Ф'); \qquad (5\text{-}83)$$

здесь $k_ф$ — коэффициент формы (для пластины $k_ф=1$); $c_м$ — теплоемкость материала.

Значения параметра Ф находятся по графикам, приведенным в [Л. 25, стр. 58—59].

5-12. РЕЦИРКУЛЯЦИЯ ГАЗОВ КАК СРЕДСТВО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПОВЫШЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕЧЕЙ

При использовании мазута и природного газа в печах с рабочими температурами менее 1 000 °С, а иногда и в печах с температурами менее 1 300 °С часто прибегают к сжиганию газа с повышенными избытками воздуха.

Такой способ понижения температуры газов невыгоден, так как увеличение избытка воздуха неизбежно вызывает увеличение потерь тепла с уходящими газами и, следовательно, возрастание расхода топлива и снижение к. п. д.

При работе с повышенными избытками воздуха подогревать воздух не имеет смысла, так как при этом будет повышаться температура горения и возникать необходимость еще большего увеличения и без того большого избытка воздуха.

Правильным выходом из положения является устройство *рециркуляции дымовых газов*. В плавильных печах чаще всего нет ограничений для температуры факела, так как производительность определяется внешним теплообменом (если расплавленный металл стекает с кусков шихты). Поэтому в плавильных печах рециркуляция газов не применяется, но в нагревательных печах нагрев лимитируется внутренним теплообменом, т. е. теплопроводностью слитков или массивных заготовок. Перегрев металла на поверхности недопустим из-за пережога или появления трещин в результате наличия чрезмерного температурного градиента. В печной технике применяются внутренняя и внешняя рециркуляция газов.

При *внутренней рециркуляции газов* отдельные струи факелов захватывают продукты горения более или менее остывшие (в результате отдачи тепла обрабатываемым изделиям в самом рабочем пространстве печи). Температура каждого факела при этом понижается. Количество газов, вовлеченных в движение горящей струи, оказывает влияние не

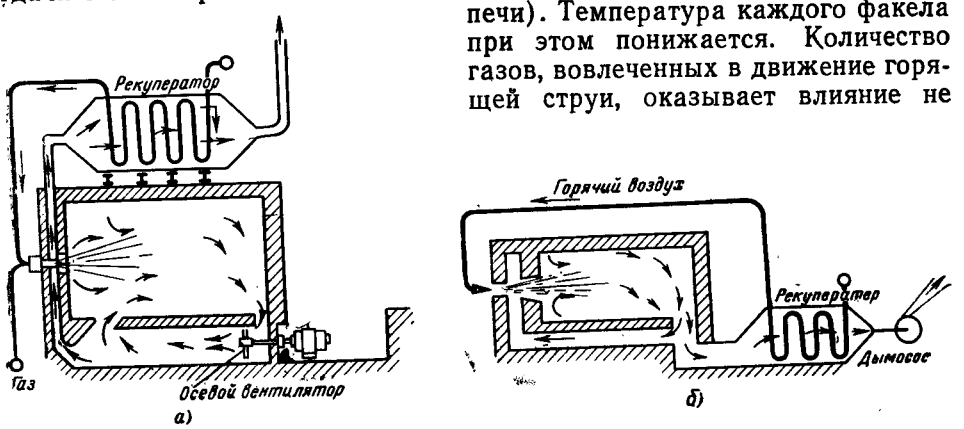


Рис. 5-14. Схемы внешней рециркуляции газов.
а — при помощи осевого вентилятора; *б* — при помощи инжекционной горелки.

только на величину и характер распределения температур в рабочей камере, но и на процесс горения газа, так как при смешивании обедняется горючая смесь и от этого удлиняется факел. Скорость струи в любом сечении, а также кратность циркуляции, как уже сказано, зависит от расстояния сечения от устья горелки l, выраженного числом диаметров сопла горелки d, т. е. от отношения l/d. Чем больше это отношение, тем больше кратность циркуляции. Следовательно, для создания большей кратности циркуляции следует брать сопла малого диаметра, т. е. разделять поток газа на ряд малых струй. При таком рассредоточении отдельные струи быстро теряют свою индивидуальность, что способст-

вует равномерному распределению температур. Кратность циркуляции будет тем больше, чем больше энергия струй затрачивается на преодоление сопротивлений, возникающих при циркуляции газов. Внутренняя циркуляция создается обычно в среднетемпературных печах с рабочей температурой 1 300—1 400 °С и менее (печи для нагрева металла перед ковкой, штамповкой, обжиговые печи и т. д.). При ней возможно осуществлять подогрев воздуха, идущего на горение газа в рекуператорах для использования тепла газов, отходящих из рабочих камер печей. Другим примером внутренней циркуляции является нагревательный колодец, показанный на рис. 1-9.

При *внешней рециркуляции газов* газы отбираются за пределами рабочего пространства печи и возвращаются в топку или в рабочую камеру печи при помощи вентилятора или за счет разрежения, создаваемого газовыми горелками (рис. 5-14). В печи при этом возникает циркулирующий газовый поток, к которому для возмещения расхода тепла добавляется некоторое количество свежих топочных газов с высокой температурой. Такое же количество газов (по массе) должно при установившемся режиме отводиться от циркуляционного потока, в противном случае имело бы место накопление газов в печи.

Обычно продукты горения, отходящие из рабочей камеры печи, обогащаются кислородом за счет присоса воздуха, при этом коэффициент избытка воздуха может возрасти с 1,05 до 2,0. Если такие дымовые газы подвести к устью газовой горелки, то кислород обратных газов будет в какой-то мере участвовать в горении газообразного топлива и заменит часть воздуха, необходимого для горения. При этом с частью воздуха, имеющей температуру $t_{обр}$ будет вноситься некоторое количество тепла, и это будет равноценно подогреву той же части воздуха в рекуператоре до температуры $t_{обр}$.

Лучше всего может быть использован кислород обратных газов, если обратные газы подвести к смесителю инжекционной горелки, так как при этом образуется хорошая смесь газообразного топлива с кислородом. Однако нужно помнить, что чрезмерное количество инертных газов, добавленных в газовоздушную смесь, может сделать эту смесь невоспламеняющейся. Характеристикой рециркуляции служит кратность рециркуляции

$$i=\frac{V_{обр}}{V_г}, \qquad (5\text{-}83а)$$

где $V_{обр}$ — количество возвращаемых газов; $V_г$ — количество газов при обычном сжигании топлива.

Количество газов в любом сечении газохода от места возврата до места отбора

$$V_{рец}=V_г+V_{обр}=(1+i)V_г. \qquad (5\text{-}84)$$

Кратность рециркуляции выбирается из условий создания в рабочем пространстве печи необходимой температуры.

Калориметрическую температуру горения рециркуляции газов можно определить из уравнения теплового баланса, отнесенного к единице количества топлива:

$$Q_н^р+I_т+I_в+I_{обр}=[v_г+(v_{обр}-4{,}76v_{обр}^{O_2})]c_к t_к. \qquad (5\text{-}85)$$

здесь $I_{обр}$ — энтальпия обратных газов; $I_в=(v^0\alpha_т-4{,}76v_{обр}^{O_2})c_в t_в$ — тепло, введенное с воздухом, причем $4{,}76v_{обр}^{O_2}$ — количество воздуха, на которое уменьшается потребность в нем за счет использования кислорода обратных газов, если они участвуют в горении топлива; $v_{обр}$ — количество обратных газов.

Отсюда получаем в развернутом виде:

$$t_к = \frac{Q^р_н + I_т + I_в + I_{обр}}{[v_т + (v_{обр} - 4{,}76v^{O_2}_{обр})]\, c_к} = \frac{Q^р_н + c_т t_т + (v^0\alpha_т - 4{,}76v^{O_2}_{обр})\, c_в t_в + v_{обр} c_{обр} t_{обр}}{[v_т + (v_{обр} - 4{,}76v^{O_2}_{обр})]\, c_к}. \quad (5\text{-}86)$$

Если пренебречь использованием кислорода обратных газов, из формулы (5-86) легко получить связь между калориметрическими температурами горения без рециркуляции $t_к$ и с рециркуляцией газов $t_{к.рец}$. В самом деле, если поделить уравнение (5-85) на величину $v_г c_к$, будем иметь:

$$\frac{Q^р_н + I_в}{v_г c_к} + \frac{I_{обр}}{v_г c_к} = \frac{(v_т + v_{обр})\, c_к t_{к.рец}}{v_г c_к},$$

откуда

$$t_{к.рец} = \frac{t_к + i\dfrac{c_{обр}}{c_к} t_{обр}}{1 + i} \quad (5\text{-}87)$$

или приближенно

$$t_{к.рец} \approx \frac{t_к + i t_{обр}}{1 + i}, \quad (5\text{-}88)$$

где $i = v_{обр}/v_т$ — кратность рециркуляции.

Пример 5-4. Определить необходимую кратность рециркуляции при сжигании мазута с $Q^р_н = 39 \cdot 10^3$ *кдж/кг* с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 1{,}1$ с тем, чтобы калориметрическая температура горения при горячем воздухе ($t_в = 800$ °С) осталось бы на том же уровне, что и при сжигании без рециркуляции, но при холодном дутье воздуха ($t_в = 20$ °С) и температуре возвращаемых газов $t_{обр} = 1\,300$ °С.

Пользуясь диаграммой горения, находим калориметрическую температуру горения при $t_в = 20$ °С и $\alpha = 1{,}1$; $t_{к.рец} = 1\,960$ °С (заданный уровень). Калориметрическая же температура горения при $t_в = 800$ °С и $\alpha = 1{,}1$ будет $t_к = 2\,520$ °С.

Подставляя в формулу выражение (5-88), имеем:

$$1\,960 = \frac{2\,520 + 1\,300i}{1 + i},$$

откуда

$$i \approx \frac{2\,520 - 1\,960}{1\,960 - 1\,300} = 0{,}847$$

и, следовательно, $v_{обр} = 0{,}847 v_г$ (около 85% общего количества газов, получаемых при горении).

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ТЕПЛОВЫЕ И МАТЕРИАЛЬНЫЕ БАЛАНСЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧЕЙ И РАСХОД ТОПЛИВА

Распределение тепла в печах характеризуется тепловыми балансами, выражающими закон сохранения энергии.

При рассмотрении теплового баланса печи одновременно с ее производственными показателями[1], можно оценить степень использования тепла, вскрыть причины малой тепловой экономичности и наметить мероприятия по улучшению работы.

[1] Под производственными показателями понимаются: во-первых, *удельная производительность печи*, т. е. количество продукции, пропущенной через печь в единицу времени, приходящееся на 1 $м^2$ пода печи или на 1 $м^3$ объема; во-вторых, *качество тепловой обработки материала* и потери продукта при обработке (угар металла, брак при обжиге и т. п.) и, в-третьих, — *себестоимость тепловой обработки материала*, отнесенная к единице продукции.

6-1. ТИПИЧНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ БАЛАНСЫ ПЕЧЕЙ

Для печей, оборудованных регенеративными или рекуперативными теплообменниками для подогрева воздуха и газообразного топлива и котлом-утилизатором для выработки водяного пара (или подогрева воды), можно составить следующие типичные тепловые балансы: 1) для рабочего пространства печи; 2) для рабочего пространства совместно с рекуператорами (или регенераторами) и 3) для всей установки в целом (с котлом-утилизатором). Для анализа тепловой эффективности отдельных элементов печи составляют также тепловые балансы регенераторов, котла-утилизатора и т. д.

Баланс тепла для печей периодического действия составляется применительно к одному рабочему циклу (например, для одной плавки, для одного обжига и т. д.), для печей непрерывного действия — применительно к 1 *ч* работы, но наибольший интерес для оценки тепловой экономичности представляют удельные тепловые балансы, отнесенные к единице количества материала — на 1 *т* или 1 *кг* конечного продукта или шихты.

Уравнение теплового баланса рабочего пространства печи или всей печи в целом в общем случае имеет вид:

$$\Sigma Q_{\text{прих}} = \Sigma Q_{\text{расх}}; \qquad (6\text{-}1а)$$

$$Q^{\text{т}}_{\text{х}} + Q^{\text{в}}_{\Phi} + Q^{\text{т}}_{\Phi} + Q'_{\text{м}} + Q_{\text{экз}} = Q''_{\text{м}} + Q_{\text{ш}} + Q_{\text{энд}} + Q_{\text{о.г}} + Q_{\text{в.г}} + Q_{\text{х.н}} + Q_{\text{м.н}} + Q_{\text{о.с}} + Q_{\text{кл}}. \qquad (6\text{-}1б)$$

В этом уравнении в левой части даны статьи прихода тепла, а в правой — расхода тепла.

Обозначения разъяснены в табл. 6-1, где можно рассмотреть структуру баланса в его приходной и расходной частях.

Нужно ясно представить себе тот участок печной установки, для которого составляется тепловой баланс, и состояние дымовых газов, воздуха и т. д. следует брать именно для рассматриваемого участка. Так, если баланс составляется для рабочей камеры, то отходящие газы имеют наиболее высокую температуру; воздух поступает на горение в нагретом состоянии из рекуператора или регенератора. При составлении баланса всей печи с регенераторами (нли с рекуператорами) температура отходящих газов будет намного ниже, а воздух в регенераторное устройство поступает с температурой, соответствующей температуре окружающей среды. Если тепловой баланс составляется для всей печной установки, включая котел-утилизатор, то к правой части уравнения (6-1б) нужно прибавить член $Q_{\text{пар}}$ — тепло, затраченное на выработку пара или горячей воды.

При плавлении шихты в мартеновских сталеплавильных печах протекают химические реакции как с выделением тепла (выгорание из шихты углерода, марганца, кремния, фосфора, серы, сгорание железа в окалину, образование шлаков), так и с поглощением тепла (испарение влаги, разложение известняка, входящего в состав шихты, восстановление железа из руды). Тепло экзотермических реакций обычно в 2—3 раза превышает тепло эндотермических реакций и составляет 10—15% общего количества тепла, введенного в плавильную камеру печи.

Тепло, выделившееся в рабочем пространстве при экзотермических реакциях, заносится в приходную часть баланса и складывается с химической энергией топлива и энтальпией нагретых топлива и воздуха, поступающих на горение. В приход тепла включается также и энтальпия исходных материалов садки.

Тепло, поглощенное при эндотермических реакциях, относится к расходной части баланса и складывается с энтальпией конечной продук-

Таблица 6-1

Структура теплового баланса рабочего пространства или всей печи

Название статьи прихода	Обозначение	Название статьи расхода	Обозначение
Приход тепла		Расход тепла	
Теплота сгорания топлива (химическая энергия топлива)	$Q_{\text{х}}^{\text{т}}$	Конечная энтальпия материала	$Q''_{\text{м}}$
		Энтальпия технологических отходов (шлака, огарков и т. д.)	$Q_{\text{ш}}$
Энтальпия воздуха, поступающего на горение	$Q_{\text{ф}}^{\text{в}}$		
Энтальпия топлива	$Q_{\text{ф}}^{\text{т}}$	Тепловой эффект эндотермических реакций, протекающих при тепловой обработке продукта, включая испарение влаги из материала	$Q_{\text{энд}}$
Энтальпия исходных материалов садки	$Q'_{\text{м}}$		
Тепловой эффект экзотермических реакций, протекающих при тепловой обработке материала	$Q_{\text{экз}}$	Энтальпия дымовых газов, отходящих из печи через газоход: газов, образующихся при сгорании топлива $Q_{\text{о. г}}^{\text{т}}$; газов, выделяющихся из шихты (из материала) $Q_{\text{о. г}}^{\text{ш}}$	$Q_{\text{о.г}}$
		Потери тепла с дымовыми газами, выбивающимися из печи в атмосферу	$Q_{\text{в.г}}$
		Потери тепла от недожога газов и вследствие диссоциации газов	$Q_{\text{х.н}}$
		Потери от механического недожога топлива: от механического недожога горючего в провале, шлаке и уносе (при твердом топливе) $Q'_{\text{м.н}}$; от утечек газообразного топлива в регенераторах через неплотности и вследствие потерь газа при реверсировании регенеративных печей $Q''_{\text{м.н}}$	$Q_{\text{м.н}}$
		Тепло, рассеянное в окружающей среде: вследствие теплопроводности кладки $Q'_{\text{о.с}}$; лучеиспусканием через открытые отверстия в печи $Q'''_{\text{о.с}}$; за счет фильтрации газов через кладку $Q''_{\text{о.с}}$; потери тепла с водой, охлаждающей кладку и другие детали печи $Q_{\text{ох}}$; потери тепла с транспортными устройствами и с тарой $Q_{\text{тр}}$	$Q_{\text{о.с}}$
		Потери тепла на нагрев кладки	$Q_{\text{кл}}$
Итого	$\Sigma Q_{\text{прих}}$	Итого	$\Sigma Q_{\text{расх}}$

ции (в данном случае с физической теплотой жидкой стали), энтальпией технологических отходов (шлака и т. п.) и различными потерями тепла.

Очень большой экзотермический эффект наблюдается в печах для выплавки медного полуфабриката (штейна) из медных руд за счет окисления сульфидов, образования шлаков и в некоторых других случаях. При выплавке чугуна из железных руд в доменных печах, наоборот, большую роль в тепловом балансе играют эндотермические реакции восстановления из руд железа и других веществ.

При нагревании сырых материалов из них выделяется влага. Кроме того, за счет сгорания или разложения отдельных веществ шихты из нее выделяются газы, примешивающиеся к дымовым газам, получающимся от сгорания топлива. Следовательно, потеря тепла с отходящими газами складывается из потери с газообразными продуктами горения и потери с газами, выделившимися из шихты.

Тепло, рассеянное в окружающей среде $Q_{о.с}$, складывается из тепла, теряемого кладкой вследствие ее теплопроводности $Q'_{о.с}$ и фильтрации газов $Q''_{о.с}$, тепла, теряемого лучеиспусканием через открытые рабочие окна и другие отверстия $Q'''_{о.с}$, и тепла, уносимого водой, охлаждающей некоторые детали печи $Q_{ох}$:

$$Q_{о.с} = Q'_{о.с} + Q''_{о.с} + Q'''_{о.с} + Q_{ох}. \qquad (6\text{-}2а)$$

Для определения затрат тепла на технологический процесс и для анализа этих затрат составляют тепловой баланс процесса (плавки, обжига, нагрева и т. п.), протекающего в технологической зоне рабочего пространства печи — в ванне плавильной печи, на поду нагревательной печи и т. д.

Тепловой баланс технологического процесса можно наглядно представить себе, рассматривая мартеновскую плавку стали:

$$Q'_м + Q_{экз} + Q'_г + Q_{техн} = Q''_м + Q_ш + Q_ф^{т.г} + Q_{энд}; \qquad (6\text{-}2б)$$

здесь $Q'_г$ — энтальпия кислорода и других газов, поглощенных ванной; $Q_ф^{т.г}$ — энтальпия технологических газов при выходе из ванны; $Q_{техн}$ — количество тепла, переданное ванне факелом и кладкой, или расход тепла на процесс, откуда

$$Q_{техн} = \Delta Q_м + \Delta Q_ф^{т.г} + Q_ш + Q_{энд} - Q_{экз}, \qquad (6\text{-}3а)$$

где $\Delta Q_м = Q''_м - Q'_м$ — прирост энтальпии материалов в ходе плавки; $\Delta Q_ф^{т.г} = Q_ф^{т.г} - Q'_г$ — разность энтальпий технологических газов, выделяющихся из ванны, и газов, поглощенных ванной (в период продувки).

Газы, выделяющиеся из ванны, состоят из окиси углерода CO и других газов, получающихся от окисления углерода при продувке ванны кислородом, а также от разложения известняка, руды и влаги. Примерно 90% выгоревшего углерода шихты расходуется на образование CO, которая частью сгорает над ванной в CO_2, а частью уносится газами из рабочего пространства, вызывая потерю тепла от химического недожога. Если под теплом экзотермических реакций понимать тепло реакций, сопровождающихся образованием горючих газов, т. е. протекающих при неполном горении, то, прибавляя к левой и правой части уравнения (6-1б) величину $Q^{т.г}_ф$ и группируя члены, мы можем написать тепловой баланс печи в другом виде:

$$Q_х^т + Q_ф^в + Q_ф^т + Q_х^{т.г} + Q_ф^{т.г} = [\Delta Q_м + \Delta Q_ф^{т.г} + Q_ш + Q_{энд} - Q_{экз}] + Q_{о.г} + Q_{в.г} + Q_{х.н} + Q_{м.н} + Q_{о.с}$$

или

$$Q_{\text{х}}^{\text{т}}+Q_{\text{ф}}^{\text{в}}+Q_{\text{ф}}^{\text{т}}+Q_{\text{х}}^{\text{т.г}}+Q_{\text{ф}}^{\text{т.г}}=Q_{\text{техн}}+Q_{\text{о.г}}+Q_{\text{в.г}}+Q_{\text{х.н}}+Q_{\text{м.н}}+Q_{\text{о.с}}; \quad (6\text{-}3б)$$

здесь $Q_{\text{х}}^{\text{т.г}}$ — теплота сгорания газов, выделяющихся из шихты.

Тепловой баланс сводят в таблицы или для наглядности изображают графически. На рис. 6-1,*а* дана диаграмма теплового баланса рабочей камеры мартеновской печи, работающей на мазуте. В скобках указан удельный расход тепла в *Гдж* на 1 *т* слитков. На рис. 6-1,*б* показан тепловой баланс электродуговой сталеплавильной печи в *Гдж* на 1 *т* слитков. В этом балансе расход электроэнергии составляет 632 *квт·ч/т*.

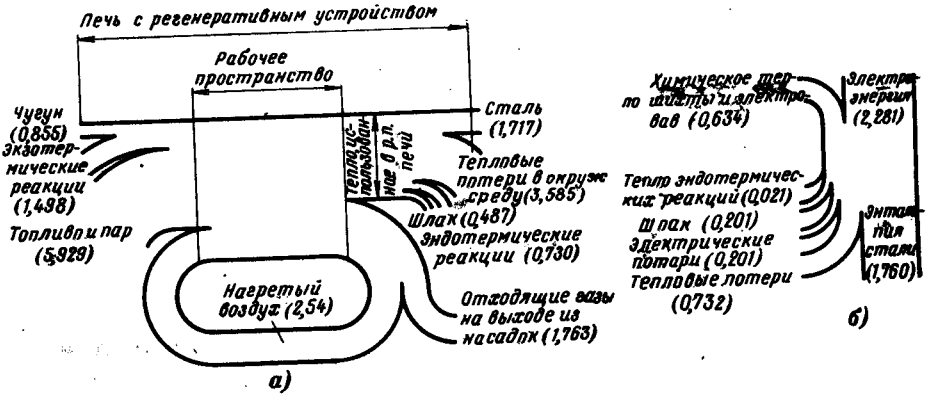


Рис. 6-1. Диаграммы тепловых балансов.

а — тепловой баланс рабочей камеры мартеновской печи без применения кислорода; *б* — тепловой баланс дуговой электросталеплавильной печи.

В электрических печах нет продуктов сгорания (за исключением небольшого количества газов, получающихся от сгорания электродов), поэтому потери тепла с отходящими газами отсутствуют.

Обозначим через b удельный расход натурального топлива, т. е. расход топлива на единицу количества обрабатываемого материала (на 1 *кг* исходной шихты или конечного продукта). Все члены уравнения теплового баланса, пропорциональные расходу топлива, можно записать следующим образом:

$$Q_{\text{к}}^{\text{т}}=bQ_{\text{н}}^{\text{р}}; \; Q_{\text{ф}}^{\text{в}}=bI_{\text{в}}; \; Q_{\text{ф}}^{\text{т}}=bI_{\text{т}}; \; Q_{\text{в.г}}=\sigma bI_{\text{в.г}}; \; Q_{\text{о.г}}=(1-\sigma)bI_{\text{о.г}}, \quad (6\text{-}4)$$

где σ — доля газов, выбивающихся из рабочего пространства; $I_{\text{в}}$ — энтальпия воздуха, идущего на сгорание, отнесенная к единице количества топлива; $I_{\text{т}}$ — энтальпия топлива на единицу количества топлива; $I_{\text{в.г}}$ — энтальпия газов, выбивающихся из рабочего пространства, на единицу количества топлива; $I_{\text{о.г}}$ — энтальпия газов, отходящих из рабочего пространства, на единицу количества топлива.

Тогда уравнение баланса для непрерывно действующей печи можно переписать в таком виде:

$$b[Q_{\text{н}}^{\text{р}}+I_{\text{в}}+I_{\text{т}}-\sigma I_{\text{в.г}}-(1-\sigma)I_{\text{о.г}}-q_{\text{х.н}}-q_{\text{м.н}}]=$$
$$=Q''_{\text{м}}-Q'_{\text{м}}+Q_{\text{ш}}+Q_{\text{эвд}}-Q_{\text{вкз}}+\Delta Q_{\text{ф}}^{\text{т.г}}+Q_{\text{о.с}}, \quad (6\text{-}5)$$

откуда удельный расход натурального топлива в килограммах [1] на единицу количества материала составляет:

$$b=\frac{[Q''_{\text{м}}-Q'_{\text{м}}+Q_{\text{ш}}+\Delta Q_{\text{ф}}^{\text{т.г}}+Q_{\text{эвд}}-Q_{\text{вкз}}]+Q_{\text{о.с}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}+I_{\text{т}}+I_{\text{в}}-\sigma I_{\text{в.г}}-(1-\sigma)I_{\text{о.г}}-q_{\text{к.н}}-q_{\text{м.н}}}. \quad (6\text{-}6)$$

[1] В случае газообразного топлива эта величина относится к 1 $м^3$ топлива.

Величина

$$Q_{\text{техн}} = Q''_{\text{м}} - Q'_{\text{м}} + Q_{\text{ш}} + \Delta Q_{\text{ф}}^{\text{т.г}} + Q_{\text{энд}} - Q_{\text{экз}}$$

представляет собой полезное тепло технологического процесса, т. е. расход тепла на собственно технологический процесс за вычетом тепла экзотермических реакций. Использовав эту величину, выражение (6-6) можно переписать в таком виде:

$$b = \frac{Q_{\text{техн}} + Q_{\text{о.с}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}} \eta_{\text{исп}}}, \tag{6-7}$$

где $\eta_{\text{исп}}$ — коэффициент использования топлива, показывающий, какая доля тепла, введенного в печь, использована в рабочем пространстве печи:

$$\eta_{\text{исп}} \approx 1 + \frac{I_{\text{т}} + I_{\text{в}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}} - \frac{q_{\text{х.н}} + q_{\text{м.н}} + \sigma I_{\text{в.г}} + (1 - \sigma) I_{\text{о.г}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}. \tag{6-8}$$

Если предположить, что $I_{\text{о.г}} \approx I_{\text{в.г}}$, то

$$\eta_{\text{исп}} \approx 1 + \frac{I_{\text{т}} + I_{\text{в}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}} - \frac{q_{\text{х.н}} + q_{\text{м.н}} + I_{\text{о.г}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}. \tag{6-9}$$

В некоторых пособиях, например [Л. 19], под коэффициентом использования тепла понимается доля тепла, использованного в рабочей камере печи, от всего располагаемого тепла:

$$Q_{\text{р}}^{\text{р}} = Q_{\text{н}}^{\text{р}} + I_{\text{т}} + I_{\text{в}}. \tag{6-10}$$

Кроме того, потери от недожога можно учитывать коэффициентом ε, и тогда при отсутствии потерь тепла от недожога, т. е. при $\varepsilon = 1$

$$\eta'_{\text{исп}} = 1 - \frac{I_{\text{о.г}}}{Q_{\text{р}}^{\text{р}}}. \tag{6-11}$$

Удельный расход топлива в этом случае будет:

$$b = \frac{Q_{\text{техн}} + Q_{\text{о.с}}}{Q_{\text{р}}^{\text{р}} \eta'_{\text{исп}} \varepsilon}. \tag{6-12}$$

Поскольку $Q_{\text{р}}^{\text{р}} = I_{\text{к}}$, т. е. располагаемое тепло равно начальной энтальпии, то, если теплоемкости $c_{\text{о.г}}$ и $c_{\text{к}}$ принять постоянными,

$$\eta'_{\text{исп}} = \frac{I_{\text{к}} - I_{\text{о.г}}}{I_{\text{к}}} = 1 - \frac{I_{\text{о.г}}}{I_{\text{к}}} \approx 1 - \frac{T_{\text{о.г}}}{T_{\text{к}}}. \tag{6-13}$$

Следовательно, коэффициент использования топлива показывает также степень использования начального температурного потенциала в рабочем пространстве печи.

Обычно количество тепла, рассеиваемого в окружающей среде, подсчитывается на 1 *ч* работы:

$$Q_{\text{о.с}} = \frac{Q_{\text{о.с}}^{\text{час}}}{G} = \tau \frac{Q_{\text{о.с}}^{\text{час}}}{P} = q_{\text{о.с}}, \tag{6-14}$$

где τ — длительность технологического процесса, *ч;* например, время плавки стали в мартеновской печи; G — часовая производительность печи; P — загрузка печи (материала, находящегося в печи).

Удельный расход топлива в килограммах на единицу количества продукции может быть выражен также формулой

$$b=\frac{Q_{\text{техн}}+\frac{Q_{\text{о.с}}}{G}}{Q^{\text{р}}_{\text{н}}\,\eta_{\text{исп}}}=\frac{Q_{\text{техн}}}{Q^{\text{р}}_{\text{н}}\,\eta_{\text{исп}}}+\frac{q_{\text{о.с}}}{Q^{\text{р}}_{\text{н}}\eta_{\text{исп}}}=b_1+b_2. \tag{6-15}$$

Таким образом, удельный расход топлива складывается из двух частей: из расхода на процесс b_1 и расхода на покрытие рассеяния тепла в окружающей среде b_2. Первая часть расхода топлива не зависит от размеров печи и ее часовой производительности. Вторая часть, наоборот, зависит от них: чем больше загрузка печи, т. е. чем больше ее часовая производительность, тем меньше удельный расход топлива (рис. 6-2).

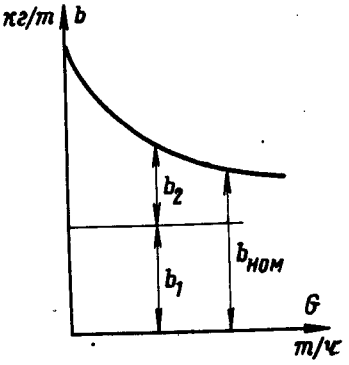


Рис. 6-2. Зависимость удельного расхода топлива b от производительности печи G.

Если выразить потери в окружающую среду $q_{\text{о.с}}$ в долях от теплоты сгорания топлива, то

$$q_{\text{о.с}}=ybQ^{\text{р}}_{\text{н}}; \tag{6-16}$$

здесь y — коэффициент, учитывающий эту потерю в долях от $bQ^{\text{р}}_{\text{н}}$.

Тогда удельный расход топлива

$$b=\frac{Q_{\text{техн}}z}{Q^{\text{р}}_{\text{н}}\eta_{\text{исп}}}, \tag{6-17}$$

где

$$z=1\Big/\left(1-\frac{y}{\eta_{\text{исп}}}\right) \tag{6-18}$$

— поправочный коэффициент, учитывающий потери тепла в окружающую среду в долях от расхода тепла на технологию.

Посредством составления тепловых балансов при проектировании печей определяется потребный расход топлива.

Часовой расход топлива непрерывно действующей печи

$$B=bG,\ кг/ч. \tag{6-19}$$

Для периодически действующих печей тепловой баланс составляется за цикл и средний часовой расход топлива:

$$B_{\text{ср}}=\frac{B_{\text{ц}}}{\tau},\ кг/ч, \tag{6-20}$$

где τ — продолжительность рабочего цикла, $ч$; $B_{\text{ц}}$ — расход топлива за цикл, *кг/цикл*.

Максимальный часовой расход топлива

$$B_{\text{макс}}=B_{\text{ср}}\xi, \tag{6-21}$$

где ξ — коэффициент неравномерности расхода топлива.

6-2. КОЭФФИЦИЕНТЫ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ

Коэффициент полезного действия рабочего пространства печи показывает, какая доля тепла, введенного в рабочую камеру, полезно используется. Он представляет собой отношение полезного тепла ко всему теп-

лу, вводимому в рабочее пространство:

$$\eta_{р.п} = \frac{Q}{Q_х^т + Q_ф^в + Q_ф^т + Q_{экз}} 100\%. \quad (6\text{-}22)$$

Технологический к. п. д. показывает, какая доля от общего расхода тепла полезно затрачивается в печи для данной технологической операции. Он представляет собой отношение полезного тепла технологического процесса к действительному расходу тепла:

$$\eta_{техн} = \frac{Q}{Q_х^т + Q_{экз}} 100\%. \quad (6\text{-}23)$$

При оценке к. п. д. за полезный расход тепла приниимают:

$$Q = Q''_м - Q'_м + Q_{энд}. \quad (6\text{-}24)$$

Если роль экзотермического тепловыделения мала, то технологический к. п. д. определяется по формуле

$$\eta_{техн} = \frac{Q}{Q_х^т}. \quad (6\text{-}25)$$

Энергетический к. п. д. представляет собой отношение тепла, использованного всей печной установкой, к затраченному теплу:

$$\eta_{эн} = \frac{Q + Q_{доп}}{Q_х^т + Q_{экз}} 100\%, \quad (6\text{-}26)$$

где $Q_{доп}$ — тепло, затраченное на выработку пара в котле-утилизаторе или на нагрев воздуха в рекуператоре, используемых вне печи (в сушилках или других устройствах).

Если печь оборудована мощными циркуляционными и дутьевыми вентиляторами, дымососом и другими дополнительными устройствами, расходующими электрическую энергию, или если печь потребляет кислород, на производство которого затрачивается значительное количество электрической энергии, необходимо в знаменатель формулы (6-26) прибавить величину $Q_{эл}$, представляющую собой тепло первичного топлива, израсходованного для выработки потребленной электрической эиергии:

$$\eta_{эн} = \frac{Q + Q_{доп}}{Q_х^т + Q_{экз} + Q_{эл}} 100\%. \quad (6\text{-}27)$$

При испытаниях печей для установления оптимального режима их работы иногда определяют коэффициент использования топлива в рабочей камере печи, который при полном сгорании определяется по формуле

$$\eta_{исп} = \frac{Q_р^р - Q_{о.г}}{Q_р^р} 100\%, \quad (6\text{-}28)$$

где $Q_р^р$ — располагаемое тепло, т. е. химическое тепло топлива, сложенное с физическим теплом компонентов горения,

6-3. ВЫЧИСЛЕНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ СТАТЕЙ ТЕПЛОВЫХ БАЛАНСОВ ПЕЧЕЙ

Расход тепла на нагрев материала определяется по формуле

$$\Delta Q_м = Q''_м - Q'_м = P(I'' - I') = P(c''t'' - c't'), \quad (6\text{-}29)$$

где P — масса нагреваемого материала, *кг*; I' и I'' — начальная и конеч-

ная его энтальпии, *кдж/кг; t′* и *t″* — начальная и конечная температуры материала, °С; *c′* и *c″* — средние его теплоемкости, соответствующие начальной и конечной температурам, *кдж/(кг·град)*.

Величины *I* и *c* для стали указаны в табл. 6-2.

Таблица 6-2

Средняя теплоемкость и энтальпия углеродистой стали в зависимости от температуры

t, °С	*c*, *кдж/(кг·град)*	*I*, *кдж/кг*	*t*, °С	*c*, *кдж/(кг·град)*	*I*, *кдж/кг*
0	0,462	0	800	0,678	542,19
100	0,473	48,15	900	0,678	610,85
200	0,490	98,20	1 000	0,698	697,78
300	0,516	154,49	1 100	0,682	749,74
400	0,541	210,61	1 200	0,682	821,03
500	0,574	271,30	1 300	0,687	891,79
600	0,596	357,00	1 400	0,698	962,96
700	0,607	424,54			

Если одновременно с нагревом происходит плавление материала, то

$$\Delta Q_м = P(u + c''t'' - c't'), \qquad (6\text{-}30)$$

где *u* — теплота плавления, равная для стали 272, чугуна 143, меди 175, алюминия 377, шлака 210 *кдж/кг*. Если материал содержит влагу, то следует учесть расход тепла на испарение, считая теплоту парообразования равной 2 490 *кдж/кг* на 1 *кг* влаги.

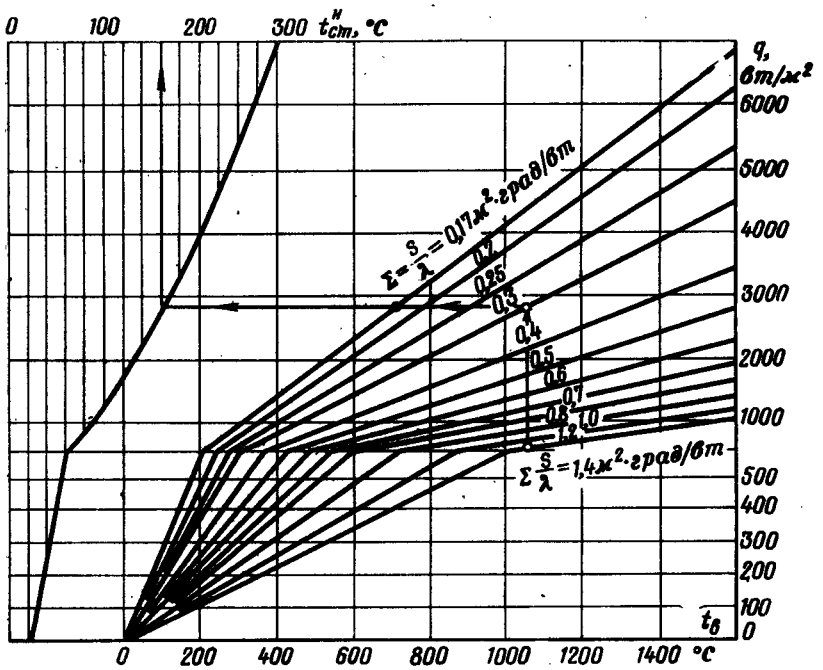


Рис. 6-3. График для определения потерь тепла в окружающую среду.

Пример. $t^{вн}_{ст} = 1\,050$ °С; $\Sigma\frac{S}{\lambda} = 0{,}3$ *м²·град/вт*; тогда $q = 2\,820$ *вт/м²* и $t^{н}_{ст} = 160$ °С.

Теплоты экзотермических и эндотермических реакций $Q_{экз}$ и $Q_{энд}$ находятся при помощи специальных расчетов на основании материальных балансов технологического процесса.

Потери тепла в окружающую среду $Q_{о.с}$ вследствие теплопроводности кладки и лучеиспускания через открытые окна и отверстия, а также расход тепла на нагревание кладки $Q_{кл}$ вычисляются по формулам теплопередачи, причем при непрерывной работе печи с неизменным тепловым режимом $Q_{кл}=0$. На рис. 6-3 приведен график для расчета потерь тепла в окружающую среду вследствие теплопроводности кладки.

Потери тепла с водой, охлаждающей некоторые детали печей, вычисляются по формуле

$$Q_{охл}=D(t''-t'), \tag{6-31}$$

где D — расход охлаждающей воды, *кг*; t' и t'' — начальная и конечная температура воды, °С.

Энтальпия топлива, поступающего в топку, определяется по формуле

$$I_т=c_т t_т, \tag{6-32}$$

где $c_т$ — средняя теплоемкость топлива.

Энтальпия воздуха, идущего на горение топлива,

$$I_в=v_в c_в t_в, \tag{6-33}$$

где $v_в$ — расход воздуха на горение, *м³/кг* или *м³/м³*, определяемый на основании расчета горения топлива; $c_в$ — средняя теплоемкость воздуха; $t_в$ — температура воздуха, °С.

Потеря тепла с отходящими газами

$$I_{о.г}=\Sigma v_{о.г} c_{о.г} t_{о.г}, \tag{6-34}$$

где $v_{о.г}$ — количество дымовых газов, отходящих из печи, *м³/кг* или *м³/м³*, определяемое на основании расчета горения топлива и газовыделения из шихты; $t_{о.г}$ — температура отходящих газов, °С; $c_{о.г}$ — средняя теплоемкость дымовых газов.

Если температура уходящих газов изменяется во времени, то в расчет по формуле (6-34) следует вводить среднее интегральное значение $t_{о.г}$. Аналогично рассчитываются потери тепла и вследствие выбивания газов через неплотности из рабочего пространства печи.

Потерю тепла от химического недожога можно в расчетах принимать по следующим эмпирическим формулам:

при газовом и мазутном отоплении

$$q_{х.н} \approx (0{,}005 \div 0{,}015)\, Q_н^р; \tag{6-35}$$

при угольном отоплении

$$q_{х.н} \approx (0{,}015 \div 0{,}02)\ Q_н^р.$$

Обычно в составе уходящих газов вследствие недожога содержится только небольшое количество окиси углерода CO, другие горючие газы встречаются редко. Если известно содержание CO, H_2 и т. д., то потеря тепла от химического недожога

$$q_{х.н}=0{,}01\,(Q_{CO}\,CO+Q_{H_2}\,H_2+\ldots)\,v_{о.г}, \tag{6-36}$$

где CO и H_2 — содержание окиси углерода, водорода и т. д. в отходящих газах, %.

Потеря тепла от механической неполноты сгорания твердого топлива

$$q_{м.н}=0{,}01 Q_C\,\Delta C, \tag{6-37}$$

где ΔC — количество невыжженного углерода в шлаках в провале и в уносе.

Пример 6-1. Определить часовой расход топлива для непрерывно действующей камерной печи, изображенной на рис. 5-7. Топливо — мазут. Производительность печи 741 *кг/ч*. Угар металла составляет 1,3% от массы нагретого металла, потеря от химического недожога $q_{х.н}=1{,}5\%$ от теплоты сгорания топлива. Температура отходящих газов $t_{о.г}=1\,300$ °С. Определить также экономию топлива в случае применения подогрева воздуха, идущего на горение, до 400 °С. Потерю тепла в окружающую среду принять равной $Q_{о.с}=131{,}5$ *квт*, температура нагрева металла $t_м=1\,250$ °С.

Расчет потребного количества и выхода продуктов горения для краткости опускаем.

Энтальпия мазута при температуре 90 °С равна:

$$I_т=c_т t_т=2{,}1\cdot 90=189\ кдж/кг.$$

Энтальпия воздуха, поступающего на горение с температурой 20 °С,

$$I_в=v^0\alpha c_в t_в=10{,}7\cdot 1{,}15\cdot 1{,}295\cdot 20=319\ кдж/кг.$$

Потеря от химического недожога

$$q_{х.н}=0{,}015\cdot 39{,}5\cdot 10^3=592\ кдж/кг.$$

Потеря от механического недожога $q_{м.н}=0$. Потеря тепла с газами, отходящими из печи с $t_{о.г}=1\,300$ °С, равна (расчет количества продуктов сгорания не приводится):

$$I_{о.г}=(v_{CO_2}c_{CO_2}+v^0_{N_2}c_{N_2}+\Delta v_в c_в+v_{в.п}c_{в.п})\,t_{о.г}=$$

$$=(1{,}586\cdot 2{,}30+8{,}453\cdot 1{,}425+1{,}601\cdot 1{,}445+1{,}47\times$$

$$\times 1{,}806)\cdot 1\,300=24\,000\ кдж/кг.$$

Коэффициент использования топлива

$$\eta_{исп}=1+\frac{I_т+I_в}{Q^р_н}-\frac{q_{х.н}+q_{м.н}+I_{о.г}}{Q^р_н}=1+\frac{189+319}{39{,}5\cdot 10^3}-\frac{592+24\cdot 10^3}{39{,}5\cdot 10^3}=0{,}391.$$

Тепло, выделяемое при сгорании металла,

$$Q_{экз}\approx 5\,660\,\frac{y}{100}=5\,660\,\frac{1{,}3}{100}=73{,}4\ кдж/кг.$$

Количество тепла, затрачиваемого на технологический процесс:

$$Q_{техн}=(Q''_м-Q'_м)+(Q_ш+Q^{т.г}_х+Q_{вид})-Q_{экз}=$$

$$=838+0-73{,}4=764{,}6\ кдж/кг.$$

Увеличение энтальпии металла при нагреве взято по табл. 6-2 равным 838 *кдж/кг*. Потеря тепла вследствие рассеяния (на 1 *кг* металла)

$$Q_{о.с}=\frac{131{,}5\cdot 3\,600}{741}=640\ кдж/кг.$$

Удельный расход мазута

$$b=\frac{Q_{техн}+Q_{о.с}}{Q^р_н\,\eta_{исп}}=\frac{764{,}6+640}{39{,}5\cdot 10^3\cdot 0{,}391}=0{,}091\ кг\ на\ 1\ кг.$$

Удельный расход условного топлива

$$b_у=\frac{bQ^р_н}{29{,}33\cdot 10^3}=\frac{0{,}091\cdot 39{,}5\cdot 10^3}{29{,}33\cdot 10^3}=0{,}122\ кг/кг.$$

Часовой расход мазута

$$B=gb=141\cdot 0{,}091=67{,}6\ кг/ч.$$

С целью уменьшения расхода топлива на печь следует поставить рекуператор для подогрева воздуха, идущего на горение. Предположим, что воздух подогревается в рекуператоре до $t_в=400$ °С. Сохранив ради простоты расчета прежние условия работы камеры, найдем, что

$$\eta_{исп}=1+\frac{189+6\,570}{39{,}5\cdot 10^3}-\frac{592+0+24\cdot 10^3}{39{,}5\cdot 10^3}=0{,}539;$$

здесь 6 570 *кдж/кг* — энтальпия воздуха при 400 °С.

Удельный расход топлива

$$b = \frac{764{,}6 + 640}{39{,}5 \cdot 10^3 \cdot 0{,}539} = 0{,}0662 \text{ кг на 1 кг}$$

металла;

часовой расход топлива

$$B = 0{,}0662 \cdot 741 = 49{,}0 \text{ кг/ч}.$$

Экономия топлива

$$\Delta B = \frac{67{,}6 - 49}{67{,}6} 100 = 27{,}5 \%.$$

В действительности условия работы камеры изменяются (в сторону увеличения температуры печи), и, следовательно, установка рекуператора дает, помимо экономии топлива, еще и увеличение производительности печи.

6-4. УДЕЛЬНЫЕ РАСХОДЫ ТОПЛИВА И СПОСОБЫ ИХ УМЕНЬШЕНИЯ

При оценке степени использования топлива и при установлении норм его расхода пользуются удельными расходами тепла или удельными расходами условного топлива, представляющими собой расход условного топлива (с теплотой сгорания, равной 29 330 *кдж/кг*) на тонну годной продукции. Этот показатель менее нагляден, чем к. п. д. печи, но вследствие своей простоты он получил широкое применение на практике, тем более, что он дает возможность в некоторой степени сравнивать печи, работающие на разных топливах.

Расчетный удельный расход условного топлива на 1 *т* материала или изделий, пропущенных через печь:

$$b_у = \frac{bQ^р_н}{29\,330}, \ т/т, \tag{6-38}$$

где b — удельный расход натурального топлива, *т/т*.

Действительный удельный расход условного топлива зависит от технологического режима работы оборудования и учитывает простои (из-за неподачи крана, перерывов в работе и т. п.). Могут иметь место также повторные нагревы изделий. Необходимо учитывать потери тепла с транспортными устройствами и на упаковку или тару, нагреваемую одновременно с изделиями (поддоны, короба и т. п.). Брак изделий исключается, и норма удельного расхода выводится на годный материал.

Удельный расход условного топлива на 1 *т* годной продукции

$$b'_у = \frac{bQ^р_н k_2}{29\,330 k_1}, \ т/т, \tag{6-39}$$

где $k_1 < 1$ — коэффициент выхода годной продукции; $k_2 > 1$ — коэффициент, учитывающий повторные нагревы, холостой ход печи и т. д.

Эти коэффициенты определяются расчетом.

Удельный расход условного топлива определяется путем аналитического расчета режима работы печей (см. пример 6-1). Примером может служить определение удельного расхода топлива для камерных печей по приведенной выше формуле. На практике широко пользуются удельными нормами расхода топлива, установленными на основе анализа статистических данных о работе печей.

Между удельным расходом условного топлива и технологическим к. п. д. существует связь:

$$b_у = \frac{Q}{29{,}330 \eta_{техн}}, \ т/т, \tag{6-40}$$

или

$$\eta_{техн} = \frac{Q}{29{,}330 b_у}, \tag{6-41}$$

где $b_у$ — удельный расход условного топлива, *т/т*; $\eta_{техн}$ — технологический к. п. д.; Q — полезный расход тепла на технологическую обработку 1 *т* продукции; 29,33 *Гдж/т* — теплота сгорания 1 *т* условного топлива.

Формулы (6-40) и (6-41) приведены для случая, когда в печи отсутствуют экзотермические реакции.

Таблица 6-3

Эксплуатационные удельные расходы условного топлива на некоторые технологические операции

Вид технологического процесса	Тип печи	Температура нагрева материала, °С	Удельный расход условного топлива, *т*, на 1 *т* годной продукции
Выплавка чугуна из железных руд	Доменная	—	0,6—0,8
Плавка углеродистой стали при холодной завалке шихты	Мартеновская	1 500—1 600	0,20—0,30
То же при жидкой завалке шихты	»	1 500—1 600	0,15—0,24
Прокатка фасонной стали	Нагревательный колодец	1 250	0,03—0,05
	Методическая	1 250	0,06—0,10
Ковка мягкой стали	Камерная	1 150—1 250	0,16—0,25
	Методическая	1 150—1 250	0,10—0,15
Термообработка стали:			
нормализация	Методическая	950—1 100	0,13—0,22
закалка	»	800—925	0,06
отпуск	»	550	0,03
Плавка чугуна	Вагранка	1 300—1 400	0,08—0,12
Плавка бронзы и латуни	Камерная	—	0,11—0,13
Обжиг цементного клинкера	Вращающаяся	1 430	0,15—0,24
Обжиг шамотных огнеупоров	Туннельная	1 250—1 350	0,20—0,30
Обжиг красного кирпича	»	800—900	0,043

В табл. 6-3 приведены данные по эксплуатационным удельным расходам условного топлива на некоторые технологические операции. Например, удельный расход топлива на нагрев мягкой стали в камерных печах перед ковкой

$$b_у = 0{,}16 \div 0{,}25 \ т/т.$$

Полезный расход тепла на нагрев 1 *т* стали до температуры 1 200 °С составляет согласно формуле (6-40):

$$Q = 0{,}838 \ Гдж/т.$$

Следовательно, технологический к. п. д. этого процесса:

$$\eta_{техн} = \frac{0{,}838}{29{,}330\,(0{,}25 \div 0{,}16)} = 0{,}11 \div 0{,}18 \text{ (от 11 до 18\%)}.$$

Из рассмотренных тепловых балансов печей и их отдельных статей можно видеть, какие меры следует предпринять для снижения расхода топлива. Особенно важно в этом отношении уменьшение потерь тепла с газами, уходящими из рабочего пространства печи, достигающих 30—60% общего расхода тепла печью. Для уменьшения этих потерь следует стремиться к более глубокому использованию тепла газов и к уменьшению их количества (путем сжигания топлива с минимальными избытками воздуха и устранения присосов воздуха в печи).

Более глубокое использование тепла газов достигается интенсификацией теплообмена в рабочем пространстве печи. Более подробно об этом сказано в гл. 5.

Следует добиваться как более глубокого использования тепла газов в самом рабочем пространстве печи, так и осуществления регенерации

тепла отходящих газов в регенеративных устройствах для подогрева газообразного топлива и воздуха, а при избытке тепла—использовать его и в котлах-утилизаторах. Путем создания в печи наиболее интенсивного факела и правильного размещения садки, т. е. путем усиления теплопередачи от газов к садке, часто удается резко повысить степень использования тепла в рабочем пространстве печи. Так, например, при отжиге листовой стали замена медленного нагрева в пачках быстрым нагревом отдельных листов в механизированной печи намного снижает расход топлива на термообработку. Повышение температуры компонентов горения, создание хорошей настильности пламени на плавильную ванну в мартеновской печи путем подбора правильной конструкции головок сокращает расход топлива и увеличивает производительность печи. Замена камерных периодических печей для обжига огнеупоров туннельными печами непрерывного действия сокращает потери тепла на периодический нагрев кладки, а также резко снижает потери тепла с отходящими газами. Расход топлива при этом сокращается в 2—3 раза. Известно много других примеров, когда в результате интенсификации теплообмена в печах или в результате применения других способов модернизации печей удельный расход топлива сильно сокращается, а производительность резко увеличивается.

Следует отметить, что подогрев воздуха и газообразного топлива, поступающих в печь, повышает температуру факела в рабочем пространстве печи, что резко усиливает теплообмен между газами и нагреваемым материалом и увеличивает производительность печи, дает возможность применять низкокалорийное топливо (например, генераторный газ вместо коксового и т. п.) и увеличивает к. п. д. печи. В самом деле, коэффициент использования топлива (величина, пропорциональная к. п. д.) зависит от величины температурного перепада газов в рабочей камере печи, что видно из формулы (6-13):

$$\eta_{\text{исп}} \approx 1 - \frac{T_{\text{о.г}}}{T_{\text{к}}}.$$

Увеличение температуры факела в высокотемпературных печах ограничивается или стойкостью огнеупоров (например, в мартеновских сталеплавильных печах), или температурным режимом подогрева изделий (например, в нагревательных печах). Однако и в высокотемпературных печах возможно путем создания рециркуляции дымовых газов значительно поднять предел применения подогрева компонентов горения.

Потери от недожога топлива $Q_{\text{х.н}}+Q_{\text{м.н}}$ должны уменьшаться путем организации правильного сжигания — улучшения конструкции топочных устройств и их эксплуатации.

Большое внимание необходимо уделять потерям тепла в окружающую среду и на нагрев кладки ($Q'_{\text{о.с}}+Q_{\text{кл}}$). Эти потери часто составляют очень большую долю от общего расхода тепла; например, $Q'_{\text{о.с}}$ в мартеновских и стеклоплавильных печах достигает 30% всего израсходованного тепла, а $Q_{\text{кл}}$ в периодически действующих печах для обжига керамики достигает больше чем 30%. Для уменьшения потерь тепла в окружающую среду через стенки, свод и под печи применяются теплоизоляционные материалы и в первую очередь — изоляционный диатомитовый кирпич, который имеет коэффициент теплопроводности в 3—5 раз меньший, чем огнеупорный шамотный или строительный красный кирпич.

Кладка выполняется многослойной — внутренний слой из огнеупорного, средний — из диатомитового, а наружный — из красного кирпича. Часто кладка делается двухслойной, но в этом случае из-за малой прочности диатомитового кирпича наружная поверхность защищается ме-

таллическим кожухом. Для уменьшения фильтрации горячих газов через кладку печи наружная поверхность кладки покрывается слоем уплотнительной обмазки. В периодически действующих печах для уменьшения потерь тепла при нагреве кладки стремятся максимально облегчить ее вес. Рекомендуется в таком случае применять легковесный огнеупорный кирпич, который соединяет в себе свойства огнеупорного и изоляционного кирпича. Толщина кладки печи выбирается такой, чтобы сумма потерь ($Q'_{о.с}+Q_{кл}$) была наименьшей.

На величину удельного расхода топлива сильно влияет режим работы печей. Если печи работают периодически, с перерывами, то на разогревы кладки расходуется лишнее топливо. При неудовлетворительной организации производства могут происходить горячие простои печей, когда печи работают вхолостую (из-за перебоев в подаче шихты, задержек кранов для загрузки и выгрузки материала и по другим причинам). Горячие простои могут сильно увеличить фактические удельные расходы топлива.

Из формулы (6-15) видно, что потери тепла за 1 *ч* работы печи $Q_{о.с}^{час}$ не зависят от ее производительности и сохраняют свою величину даже при холостом ходе печи. Следовательно, чем более напряженно работает печь, тем ниже удельный расход топлива и тем выше к. п. д. печи.

Следует отметить, что в настоящее время еще многие промышленные печи имеют невысокие к. п. д. — их практические значения часто находятся в пределах от 6 до 30% в зависимости от конструкции печей, рода операций, условий сжигания топлива, качества и условий эксплуатации и т. д. Теоретически же возможно достижение очень высоких к. п. д. печей. При современном уровне знаний в этой области есть возможность строить печи с к. п. д. в 75% и более. Такие печи характеризуются применением совершенных топливосжигающих устройств (высокая степень выжига шлака, незначительный унос, отсутствие химического недожога), хорошей тепловой и уплотнительной изоляцией кладки, глубоким использованием тепла уходящих газов, хорошей организацией производства (большая удельная производительность печи, отсутствие всякого рода горячих простоев, а также непрерывность работы), механизацией процессов загрузки, перемещения шихты внутри печи и выгрузки обрабатываемого материала, хорошим тепловым контролем и автоматическим регулированием всего процесса или его важнейших частей.

Промышленные печи, как известно, потребляют очень большие количества высококачественного топлива, и повышение экономичности их имеет большое народнохозяйственное значение.

6-5. МАТЕРИАЛЬНЫЕ БАЛАНСЫ ПЕЧЕЙ

Материальные балансы выражают закон сохранения массы материалов, подвергаемых тепловой обработке в печах. Они составляются обычно в тех случаях, когда в печах осуществляются сложные технологические процессы, связанные с изменением структуры материала, т. е. когда из исходных материалов получают продукты, отличающиеся от них по своим свойствам. При этом материалы полностью или частично меняют свое агрегатное состояние. Материальные балансы составляются при установлении производственных норм расхода материалов и выхода продуктов процесса. Например, для вращающейся печи для обжига цементного клинкера (рис. 1-6) уравнение материального баланса будет иметь вид:

$$\Sigma M_{прих}=\Sigma M_{расх}$$

или

$$M_{\text{сырья}} + M_{\text{топл}} + M_{\text{возд}} = M + (M_{H_2O} + M_{CO_2} + M_{\text{ун}})_{\text{сырья}} + (M_{\text{золы}} + M_{\text{о.г}})_{\text{топл}}. \quad (6\text{-}42)$$

Ниже приводится материальный баланс печи на 1 *кг* обожженного клинкера. Здесь же приведена расшифровка статей баланса, входящих в уравнение (6-42):

Приход		Расход:	
Масса сухой части сырья $M_{\text{сырья}}$	1,66	Масса обожженного клинкера M	1
» влаги сырья M_{H_2O}	0,91	» углекислоты из сырья M_{CO_2}	0,60
» топлива $M_{\text{топл}}$	0,22	» влаги сырья M_{H_2O}	0,93
» воздуха для горения $M_{\text{возд}}$	2,36	» уноса сырья $M_{\text{ун}}$	0,06
		» продуктов горения $M_{\text{о.г}}$ . .	2,56
		В том числе CO_2	0,57
$\Sigma M_{\text{прих}}$=5,15		$\Sigma M_{\text{расх}}$=5,15	

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

РЕГЕНЕРАЦИЯ ТЕПЛА ГАЗОВ, ОТХОДЯЩИХ ОТ ПЕЧЕЙ. АВТОНОМНЫЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ НАГРЕВ ВОЗДУХА

7-1. СПОСОБЫ НАГРЕВА КОМПОНЕНТОВ ГОРЕНИЯ (ВОЗДУХА И ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА)

Нагрев воздуха и горючего газа перед горением осуществляется в теплообменниках рекуперативного или регенеративного типа, принцип действия и конструкция которых описаны ниже. В основе его лежит идея регенерации тепла горячих дымовых газов, покидающих рабочее пространство печи, или возврат части тепла раскаленных материалов, прошедших обжиг (или другую тепловую обработку), и шлаков, выходящих из зоны высоких температур. Если газы, покидающие печь способны гореть (горючие газы чугунолитейных вагранок и т. д.), то они дожигаются и используются на нагрев компонентов горения. Тепло отходящих газов, тепло раскаленных материалов и шлаков представляет собой вторичные энергетические ресурсы, и его использование повышает тепловую экономичность огнетехнических агрегатов. На рис. 7-1 показана схема регенерации тепла в доменной печи. Доменный газ, выходящий из печи, проходит очистку от пыли (см. гл. 11), сжигается в регенеративных воздухонагревателях (каупера), продукты горения нагревают кирпичную насадку и выходят через дымовую трубу в атмосферу. Сжатый воздух, подаваемый от турбовоздуходувки, продувает раскаленную насадку другого каупера, находящегося на охлаждении, и, нагреваясь до 1 100—1 200 °С, вдувает-

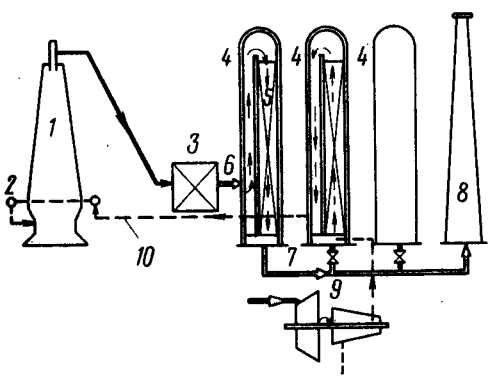


Рис. 7-1. Схема регенерации тепла в доменной печи.

1 — доменная печь; *2* — коллектор дутья; *3* — очистка доменного газа; *4* — каупера; *5* — регенеративная насадка; *6* — горелка; *7* — отвод продуктов горения; *8* — дымовая труба; *9* — турбовоздуходувка; *10* — подвод горячего дутья.

ся через фурмы в горн доменной печи. Два каупера одновременно нагреваются (находятся «на газу»), третий охлаждается — находится на «дутье» (периоды могут быть и другими).

Рассмотрим наиболее часто встречающийся случай регенерации тепла дымовых газов, выходящих из рабочей камеры печи с высокой температурой $t_{о.г}$, когда осуществляется только подогрев воздуха до температуры $t_в$ (рис. 7-2).

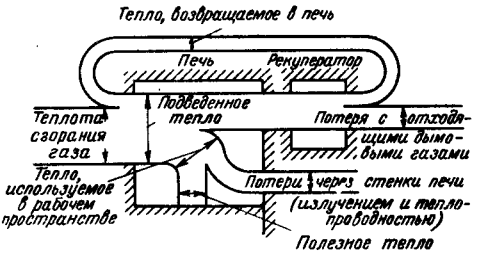


Рис. 7-2. Диаграмма теплового баланса печи с регенерацией тепла отходящих газов.

Энтальпия отходящих газов

$$I_{о.г} = [v^0_г + (\alpha - 1)v^0]c_{о.г}t_{о.г},\ кдж/кг\ (кдж/м^3). \qquad (7\text{-}1)$$

Энтальпия нагретого воздуха

$$I_в = v^0 \alpha c_в t_в,\ кдж/кг\ (кдж/м^3). \qquad (7\text{-}2)$$

Эффективность регенерации тепла характеризуется коэффициентом регенерации r:

$$r = \frac{I_в}{I_{о.г}} = \frac{v^0 \alpha c_в t_в}{(v^0_г + \Delta\alpha v^0)c_{о.г}t_{о.г}} = \frac{1}{\left[\frac{1}{\alpha}\left(\frac{v^0_г}{v^0}\right) + \frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right]} \frac{t_в}{t_{о.г}} \frac{c_в}{c_{о.г}}. \qquad (7\text{-}3)$$

Из уравнения (7-3) видно, что коэффициент регенерации тем больше, чем больше отношение температур $t_в/t_{о.г}$, чем меньше параметр $v^0_г/v^0$ и чем больше коэффициент избытка воздуха в топочном устройстве α. Мы видели, что отношение $v^0_г/v^0$ меняется от 1,1 до 2,2 и, следовательно, при одном и том же соотношении температур $t_в/t_{о.г}$ коэффициент регенерации у высококалорийных горючих газов больше, чем у низкокалорийных. Что касается отношения $c_в/c_{о.г}$, то при отношении $t_в/t_{о.г}$ в пределах 0,4—1,0 оно изменяется в пределах 0,85—0,94.

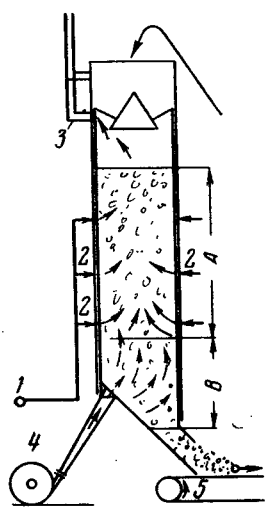


Рис. 7-3. Схема регенерации тепла остывающего материала в шахтной печи для обжига кускового матернала.

1 — газопровод; *2* — горелки; *3* — отвод продуктов горения; *4* — вентилятор; *5* — транспортер готового материала; *A* — зона нагрева; *B* — зона охлаждения.

На рис. 7-3 показан способ регенерации тепла за счет нагрева воздуха раскаленным материалом, прошедшим нагрев во время тепловой обработки его в рабочей части печи. Такой нагрев возможен только в том случае, если материал инертен и не меняет своих свойств при продувке его воздухом (керамика, вяжущие материалы и т. д.), например в туннельной печи для обжига керамических изделий, изображенной на рис. 1-3. Регенерация тепла в такой печи осуществляется следующим образом. Обожженные изделия, уложенные на вагонетках, из зоны высоких температур перемещаются в зону остывания, где обдуваются воздухом. Воздух нагревается до 900—1 200 °С (в зависимости от температуры обжига) и поступает на горение в зону высоких температур. Коэффициент регенерации в этом случае

$$r = \frac{bv^0 \alpha c_в t_в}{c_м t_м} = bv^0 \alpha \frac{c_в}{c_м}\frac{t_в}{t_м}; \qquad (7\text{-}4)$$

здесь b — удельный расход натурального топлива, *кг/кг (м³/кг)*; $c_м$ — средняя теплоемкость материала; $t_м$ — температура нагрева материала, °С.

7-2. ЭКОНОМИЯ ТОПЛИВА ОТ ПРИМЕНЕНИЯ ГОРЯЧЕГО ВОЗДУХА

При работе на горячем воздухе повышается калориметрическая температура горения топлива, а следовательно, и действительная температура печи. Производительность печи повышается, а расход топлива понижается. Вычислить удельные расходы топлива при работе на холодном воздухе и при горячем дутье можно на основании тепловых балансов печи. Будем считать, что во всех случаях, рассмотренных ниже, сжигается одно и то же топливо (газ или мазут) с теплотой сгорания $Q_н^р$. Установка работает со следующими расходами топлива: B_1 — часовой расход топлива при работе без подогрева воздуха, соответствующий ему удельный расход (на единицу количества шихты или материала) будет b_1; B_2 — то же с подогревом воздуха в воздухонагревателе, соответствующий ему удельный расход будет b_2.

Удельный расход, как следует из формулы (6-15) складывается из двух частей: из расхода топлива на собственно технологический процесс b_1 и из расхода топлива на покрытие потерь тепла от рассеяния в окружающую среду b_2.

Если выразить потери $Q_{о.с}$ в долях от теплоты сгорания топлива $Q_{о.с}=y_1 b_1 Q_н^р$, где y_1 — коэффициент, учитывающий потерю в окружающую среду, то

$$b_1=\frac{Q_{техн} z_1}{Q_н^р \eta_{1исп}}, \tag{7-5}$$

причем

$$z_1=\frac{1}{1-y_1/\eta_{1исп}}; \tag{7-6}$$

здесь z_1 — коэффициент, учитывающий потери в окружающую среду (в долях от расхода тепла на технологию). Коэффициент y берется на основании детального расхода потерь тепла в окружающую среду или по опытным данным.

Соответственно удельный расход топлива при горячем дутье будет:

$$b_2=\frac{Q_{техн} z_2}{Q_н^р \eta_{2исп}}. \tag{7-7}$$

Экономия топлива от подогрева воздуха будет (на единицу количества шихты или продукта):

$$Э_1=b_1-b_2=\frac{Q_{техн}}{Q_н^р}\left(\frac{z_1}{\eta_{1исп}}-\frac{z_2}{\eta_{2исп}}\right) \tag{7-8}$$

или в долях от расхода топлива

$$Э_1=\frac{b_1-b_2}{b_1}=1-\frac{b_2}{b_1}=1-\frac{\eta_{1исп}}{\eta_{2исп}}\frac{z_2}{z_1}. \tag{7-9}$$

Абсолютная экономия

$$\Delta B=G_2(b_1-b_2), \tag{7-10}$$

где G_2 — производительность печи на горячем воздухе.

Если пренебречь потерями тепла от химического недожога топлива, то коэффициент использования можно выразить формулами:
без подогрева воздуха

$$\eta_{1\text{исп}} = 1 - \frac{I_{\text{о.г}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}, \qquad (7\text{-}11)$$

с подогревом воздуха

$$\eta_{2\text{исп}} = 1 + \frac{I_{\text{в}} - I_{\text{о.г}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}. \qquad (7\text{-}12)$$

Количество регенерированного (отданного воздуху) тепла можно выразить через величину $I_{\text{о.г}}$ и коэффициент регенерации тепла r, показывающий долю возвращаемого процессу тепла отходящих газов

$$I_{\text{в}} \approx I_{\text{о.г}} r \varphi_{\text{р}} (1 - \sigma), \qquad (7\text{-}13)$$

где σ — доля газов, выбивающихся из печи; r — коэффициент регенерации тепла в теплообменнике; $1-\sigma$ — доля газов, проходящих через рекуператор (учитывает выбивание газов из печи); $\varphi_{\text{р}}$ — поправочный коэффициент, учитывающий потери тепла рекуператором.

Тогда, подставляя это значение в формулу (7-12) имеем:

$$\eta_{2\text{исп}} = 1 - \frac{I_{\text{о.г}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}} (1 - r\varphi_{\text{р}})(1 - \sigma). \qquad (7\text{-}14)$$

Экономия топлива за счет подогрева воздуха составит:

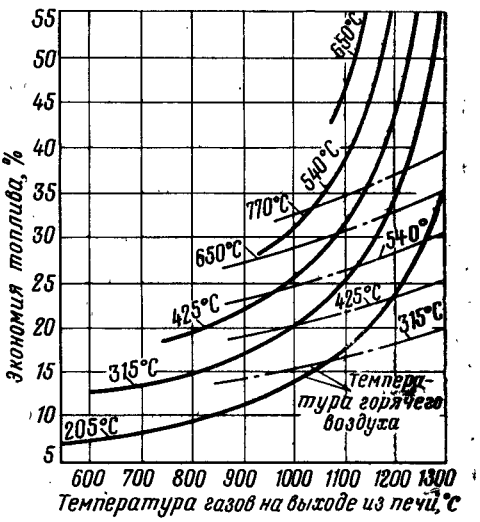


Рис. 7-4. Экономия топлива в зависимости от температуры нагрева воздуха для доменного и природного (пунктир) газов.

$$\text{Э} = \frac{b_1 - b_2}{b_1} = 1 - \frac{b_2}{b_1} = 1 - \frac{\left(1 - \dfrac{I_{\text{о.г}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}\right)\dfrac{z_2}{z_1}}{1 - \dfrac{I_{\text{о.г}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}(1 - r\varphi_{\text{р}})(1 - \sigma)}. \qquad (7\text{-}15)$$

На рис. 7-4 показан график экономии топлива в зависимости от температуры нагрева воздуха для доменного и природного газов.

Пример. Нагревательная методическая печь работает на природном газе с $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 35$ *Мдж/м*³. Определить экономию топлива от подогрева воздуха, идущего на горение, до 450 °С, если даны: температура отходящих газов $t_{\text{о.г}} = 800$ °С, коэффициент избытка воздуха по газам $\alpha = 1{,}05$, потери тепла рекуператором в окружающую среду 5%, температура газов за рекуператором 200 °С. Через рекуператор проходит 85% газов. Энтальпия отходящих газов по It-диаграмме $I_{\text{о.г}} = 13$ *Мдж/м*³. Энтальпия газов за металлическим рекуператором $I_{\text{у.г}} = 3{,}36$ *Мдж/м*³. Степень регенерации

$$r = \frac{I_{\text{о.г}} - I_{\text{у.г}}}{I_{\text{о.г}}} = \frac{13 - 3{,}36}{13} = 0{,}74.$$

Примем $\varphi_{\text{р}} = 0{,}95$ и $z_2/z_1 \approx 1$. Экономия топлива

$$\text{Э} = 1 - \frac{1 - \dfrac{13}{3{,}36}}{1 - \dfrac{13}{35}(1 - 0{,}74 \cdot 0{,}95) \cdot 0{,}85} = 0{,}19\ (19\ \%).$$

7-3. АВТОНОМНЫЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ НАГРЕВ ВОЗДУХА

Далеко не всегда удается использовать тепло газов, отходящих от печей для нагрева воздуха. Главная причина этого состоит в том, что газы от печей выносят много пыли, технологического уноса, шлака и других включений, взвешенных в потоке, а также содержат много ядовитых газов, вредных для здоровья. Много пыли содержится в газах от отражательных печей для выплавки из концентратов медной руды промежуточного продукта (штейна), в которых пылесодержание доходит до 100—200 *г/м*^{3}. Дело усложняется тем, что из-за высокой температуры газов (1 200—1 300 °С) часть пыли находится в размягченном состоянии и может шлаковать поверхность нагрева теплоиспользующих установок. Рекуператоры и регенераторы быстро загрязняются и выходят из строя, и попытка применять их каждый раз заканчивалась неудачей.

Шахтные печи заводов цветной металлургии (ватер-жакетные печи) выносят рудную пыль, пары и окислы металла от 3 до 8% от всей массы шихты и содержат 14—16% окиси углерода CO и до 4—5% сернистого ангидрида SO_2. Также много пыли выносят газы от чугунолитейных вагранок, в составе которых содержится окись углерода в количестве 8—12%. Окись углерода необходимо обезвредить дожиганием в специальных устройствах.

Большая запыленность отходящих газов имеет место и в циклонных печах для тепловой обработки мелкозернистых материалов, а также в печах с «кипящим» и взвешенным слоем для обжига и плавления сыпучих материалов.

Кроме того, часто отходящие газы имеют невысокую температуру (например, за шахтными печами 300—400 °С), в то время как для них желательно нагревать воздух до 500—700 °С. Во всех перечисленных выше случаях рекомендуется использовать автономные воздухоподогреватели, снабженные топками для сжигания газа. Чистота продуктов горения, обтекающих поверхности нагрева воздухоподогревателей, исключает возможность их загрязнения и обеспечивает нормальную эксплуатацию. Возможна также работа топок автономных воздухоподогревателей на мазуте при обеспечении его бездымного сжигания применением ротационных форсунок или циклонных камер. Ниже описываются возможные конструкции автономных воздухоподогревателей.

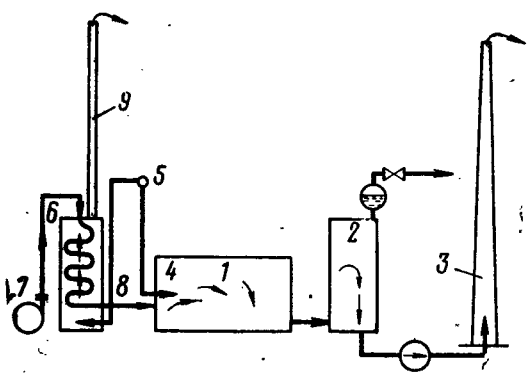


Рис. 7-5. Схема автономного подогрева компонентов горения для печи.

1 — печь; *2* — котел-утилизатор; *3* — дымовая труба; *4* — горелка; *5* — газопровод; *6* — воздухоподогреватель; *7* — воздуходувка; *8* — подвод горячего воздуха к печи; *9* — продукты сгорания от воздухоподогревателя.

При сжигании топлива в печи с нагретым воздухом в рабочем пространстве ее развиваются более высокие температуры, получается экономия топлива, а производительность печей увеличивается. Ниже будет показано, что при достаточно высоком подогреве воздуха (до 500—800 °С) экономия топлива от применения горячего дутья будет больше расхода топлива для автономного подогрева воздуха, что является очень важной предпосылкой организации такого подогрева воздуха. Тепло отходящих от печей запыленных горячих газов целесообразно использовать для получения пара и горячей воды в котлах-утилизато-

рах. Схема автономного подогрева воздуха с таким рациональным использованием этих газов приведена на рис. 7-5.

Воздухоподогреватель имеет независимую топку, работа которой автоматически регулируется в зависимости от температуры воздуха и его расхода для сжигания газа. Если температура газов высока, как, например, в отражательной медеплавильной печи, где она составляет 1 100—1 300 °С, а часть пыли находится в расплавленном состоянии, то за печью устанавливается котел-утилизатор с экраном-шлакогранулятором. Посредством последнего резко снижается температура еще до конвективной поверхности котла, и частички шлака затвердевают (гранулируются). Котел вырабатывает пар энергетических параметров, который передается для использования в турбинах заводской ТЭЦ.

7-4. ЭФФЕКТИВНОСТЬ АВТОНОМНОГО НАГРЕВА ВОЗДУХА

Для простоты будем считать, что как печь, так и топка автономного воздухоподогревателя работают на одном и том же топливе (природном газе или мазуте). Допустим, что производительность печи при работе на холодном воздухе была G_1 и ее расход топлива составлял B_1, а при горячем дутье воздуха (имеющего энтальпию $I_в$ на единицу количества топлива) производительность увеличилась до G_2, а расход топлива составил B_2. Часовой расход топлива в топке автономного воздухоподогревателя будет:

$$B_р = \frac{B_2 I_в}{Q_н^р \eta_р}; \tag{7-16}$$

здесь $I_в$ — энтальпия нагретого воздуха на единицу топлива; $\eta_р$ — коэффициент полезного действия автономного теплообменника.

Общий расход топлива установкой при автономном нагреве воздуха составит:

$$B = B_2 + B_р = \frac{G_2 Q_{техн} z_2}{Q_н^р \eta_{2исп}} + \frac{B_2 I_в}{Q_н^р \eta_р}. \tag{7-17}$$

При той же производительности G_2 расход топлива при работе печи без подогрева был бы:

$$B_1 = \frac{G_2 Q_{техн} z_1}{Q_н^р \eta_{1исп}}. \tag{7-18}$$

Экономия топлива при автономном подогреве составит:

$$Э_2 = \frac{B_1 - B_2}{B_1} = 1 - \frac{B_2}{B_1} = 1 - \frac{\eta_{1исп}}{\eta_{2исп}} \frac{z_2}{z_1} \left(1 + \frac{I_в}{Q_н^р \eta_р}\right). \tag{7-19}$$

Если в топке автономного воздухоподогревателя будет сжигаться такое количество топлива, которое сэкономлено в печи от применения горячего воздуха, т. е. когда $B_1 - B_2 = B_р$ или экономия топлива от применения горячего воздуха сводится к нулю (т. е. когда $Э_2 = 0$), то

$$\frac{\eta_{1исп}}{\eta_{2исп}} \frac{z_2}{z_1} \left(1 + \frac{I_в}{Q_н^р \eta_р}\right) = 1, \tag{7-20а}$$

или

$$\frac{I_в}{Q_н^р} = \frac{\eta_{2исп}}{\eta_{1исп}} \frac{z_1}{z_2} - 1. \tag{7-20б}$$

Пример 7-1. Приведем расчет эффективности для отражательной печи, изображенной на рис. 1-12.

Характеристика печи, расчет горения топлива (высокосернистого мазута) и определение производительности печи в зависимости от подогрева воздуха приведены ранее, в примере 5-1. Данный расчет является его продолжением.

Определим коэффициенты использования мазута в печи при горячем дутье воздуха $t_в=800$ °С и $t_{о.г}=1\,260$ °С:

$$\eta_{1исп}=1+\frac{I_т+I_в}{Q_н^р}-\frac{q_{х.н}+q_{м.н}+I_{о.г}}{Q_н^р}=1+\frac{189+12\,200}{38{,}4\cdot10^3}-$$

$$-\frac{110+0+23\,750}{38{,}4\cdot10^3}=0{,}693;$$

здесь энтальпия мазута, нагретого перед сжиганием при $t_т=90$ °С,

$$I_т=c_т t_т=2{,}1\cdot90=189\ кдж/кг;$$

энтальпия воздуха, идущего на горение с температурой $t_в=800$ °С,

$$I_в=\alpha v^0 c_в t_в=1{,}10\cdot10{,}05\cdot1{,}413\cdot800=12\,200\ кдж/кг;$$

энтальпия отходящих газов при температуре $t_{о.г}=1\,260$ °С и $\alpha=1{,}10$

$$I_{о.г}=(v_{RO_2}c_{CO_2}+v^0_{N_2}c_{N_2}+\Delta v_в c_в+v_{H_2O}c_{H_2O})\,t_{о.г}=$$

$$=(1{,}58\cdot2{,}99+8{,}02\cdot1{,}425+10{,}15\cdot1{,}466+1{,}34\cdot1{,}803)\,1\,260=23\,750\ Кдж/кг.$$

Средняя теплоемкость газов при 800 °С

$$c_{о.г}=\frac{23\,750}{11{,}94\cdot1\,260}=1{,}33\ кдж/(м^3\cdot град).$$

Потерю тепла от химической неполноты сгорания принимаем по [Л. 4]:

$$q_{х.н}=0{,}02Q_н^р=0{,}02\cdot38{,}4\cdot10^3=110\ кдж/кг.$$

Коэффициент использования топлива при холодном воздухе (20 °С) и $t_{о.г}=1\,260$ °С

$$\eta_{1исп}=1+\frac{189+289}{38{,}4\cdot10^3}-\frac{110+0+23\,750}{38{,}4\cdot10^3}=0{,}375.$$

Калориметрическая температура сгорания за счет подогрева воздуха до $t_в=800$ °С увеличится с $t_{1к}=2\,050$ °С до $t_{2к}=2\,560$ °С (расчет приведен ранее, в примере 5-1).

Производительность печи вследствие повышения температуры в печи увеличится (по шихте) с $G_1=31{,}5$ *т/ч* до $G_2=61{,}2$ *т/ч*, а удельный съем продукции с $g_1=3{,}9$ *т/(м²·сутки)* до $g_2=7{,}52$ *т/(м²·сутки)*, т. е. более чем в два раза (расчет для краткости опущен).

Определим экономию топлива, расходуемого в отражательной печи по формуле (7-19):

$$Э_2=1-\frac{B_2}{B_1}=1-\frac{\eta_{1исп}z_2}{\eta_{2исп}z_1}\left(1+\frac{I_в}{Q_н^р\,\eta_п}\right)=$$

$$=1-\frac{0{,}375}{0{,}693}\cdot\frac{1{,}17}{1{,}275}\left(1+\frac{12\,220}{38{,}4\cdot10^3\cdot0{,}77}\right)=0{,}3\ (30\%),$$

здесь z_1 и z_2 — коэффициенты, учитывающие потери в окружающую среду. По данным книги [Л. 19] эти потери на 1 $м^2$ пода составляют 62,8—125,6 *Мдж/(м²·ч)*.

Считая печь хорошо изолированной, принимаем $y_1=0{,}081$, тогда

$$z_1=\frac{1}{1-\frac{y_1}{\eta_{1исп}}}=\frac{1}{1-\frac{0{,}081}{0{,}375}}=1{,}275.$$

При работе на горячем воздухе $y_2=1{,}25\cdot0{,}081=0{,}102$ и $z_2=\dfrac{1}{1-\dfrac{0{,}102}{0{,}693}}=1{,}17.$

Экономия $Э_2$ составляет около 30%. Кроме того, котел-утилизатор, вырабатывающий пар энергетических параметров в количестве 30 *т/ч*, дает экономию топлива в размере $Э_3=25{,}6\%$. Общая экономия топлива составит:

$$Э_2+Э_3=30+25{,}6=55{,}6\%.$$

7-5. РЕГЕНЕРАТОРЫ И РЕКУПЕРАТОРЫ ДЛЯ НАГРЕВА ВОЗДУХА И ГАЗА

Как было указано выше, подогрев воздуха и газа осуществляется в регенераторах или рекуператорах путем использования тепла дымовых газов, уходящих из рабочих камер печей. Регенераторы применяются в мартеновских сталеплавильных печах, в которых подогрев воздуха и газа доходит до 1 000—1 200°. Кроме того, регенераторы применяются в печах для варки стекла, для нагрева крупных стальных слитков перед прокаткой. Описание таких печей приведено в гл. 1. Принцип работы регенераторов заключается в попеременном нагреве двух теплоемких кирпичных насадок (решеток) газами, выходящими из рабочей камеры печи, с последующим пропуском через нагретую насадку подогреваемого газа или воздуха. Подогрев газа или воздуха в регенераторах связан с переключением последних то на нагрев, то на охлаждение. Это требует периодических перемен направления движения пламени в рабочей камере печи, что вызывает необходимость переключения топочных устройств; таким образом, весь процес работы печи становится реверсивным. Это усложняет конструкцию печи и удорожает ее эксплуатацию, но способствует равномерному распределению температур в рабочем пространстве печи.

Конструкция и расчет кирпичных регенераторов приведены в ряде руководств [Л. 4]. Недостатком их является громоздкость из-за слабого теплообмена.

Принцип работы рекуператора представляющего собой поверхностный теплообменник, состоит в непрерывной передаче тепла дымовых газов, уходящих из рабочей камеры печи, нагреваемому воздуху или газообразному топливу.

Рекуператор характеризуется непрерывным движением газов в одном направлении, что сильно упрощает конструкцию печей и удешевляет строительство и эксплуатацию.

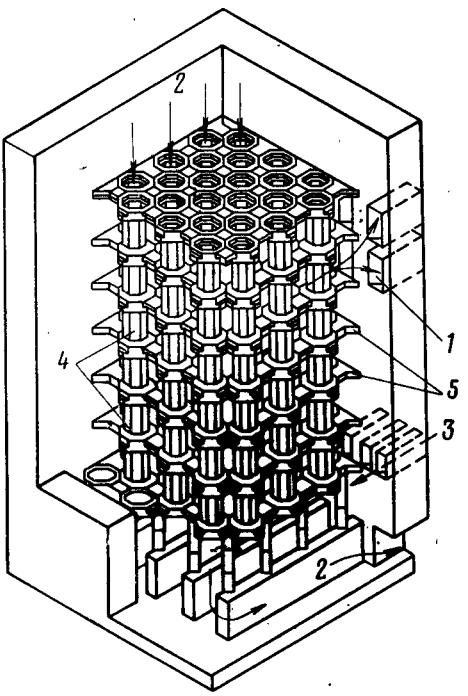


Рис. 7-6. Трубчатый керамический рекуператор.

1 — нагретый воздух; *2* — дымовые газы; *3* — холодный воздух; *4* — керамические трубы; *5* — перегородки.

На рис. 7-6 показан распространенный керамический рекуператор, в котором трубы составляются из восьмигранных керамических элементов, а пространство между трубами перекрыто фасонными плитками. Внутри труб движутся дымовые газы, а снаружи (в поперечном направлении) — нагреваемый воздух. Толщина стенок труб составляет 13—16 *мм* и представляет значительное термическое сопротивление. Коэффициент теплопередачи (отнесенный к воздушной поверхности) составляет 6—8 $вт/(м^2 \cdot град)$. Элементы керамических рекуператоров изготовляются из шамотной или из какой-либо другой более теплопроводной огнеупорной массы с последующим обжигом. В отдельных случаях применяются карборундовые рекуператоры, так как карборунд выгодно отличается от шамота высокой теплопроводностью и термической прочностью. Преимуществами керамических рекуператоров являются

их высокая огнеупорность и хорошая термическая стойкость — материал не портится при пропуске через рекуператор дымовых газов с очень высокой температурой. К недостаткам керамических рекуператоров относятся их малая плотность, большая теплоемкость, плохая теплопередача от дымовых газов к воздуху и расстройство соединений элементов от сотрясений и перекосов. Эти недостатки сильно ограничивают распространение керамических рекуператоров, и они применяются лишь в непрерывно действующих печах, установленных в цехах, где нет механизмов ударного действия (например, паровых молотов).

Наибольшее распространение получили металлические рекуператоры, имеющие наиболее благоприятные перспективы развития. Экономическая целесообразность установки таких рекуператоров подтверждается быстрой окупаемостью затрат на сооружение (0,25—0,35 лет).

Металлические рекуператоры отличаются эффективной теплопередачей, малой теплоемкостью, а следовательно, быстрой готовностью к нормальной работе и большой плотностью. Элементы металлических рекуператоров изготовляются из различных металлов в зависимости от рабочей температуры материала и состава дымовых газов, проходящих через рекуператор. Простые черные металлы — углеродистая сталь и литейный серый чугун — начинают интенсивно окисляться при невысоких температурах (500 °С), и поэтому для изготовления рекуператоров применяются жаростойкие чугун и сталь, в состав которых входят в качестве легирующих добавок никель, хром, кремний, алюминий, титан и др., которые повышают сопротивляемость металла окалинообразованию. Из чугунов наиболее подходящими являются природно-легированный (халиловский) чугун и кремнистый чугун «силал». Высокохромистый чугун с содержанием хрома 10—30% дорог и очень трудно поддается обработке. Максимальные температуры применения разных металлов имеют следующие значения (°С):

Мягкая сталь	400
Углеродистая сталь алитированная	500—600
Обыкновенный серый литейный чугун	450
Литейный чугун с добавкой хрома (Cr=1÷1,5%)	600
Природно-легированный (халиловский) чугун	600
Кремнистый чугун „силал" (Si=5,5÷6,5%; Cr=0,5÷1%)	700
Жаростойкий чугун с добавкой хрома (Cr=10÷30%)	700—900
Жаростойкая сталь с содержанием в качестве легирующих добавок Cr, Ni, Si, Ti и пр. (аустенитные хромоникелевые, сильхромовые и др. высоколегированные стали	700—1 100

Стоимость жаростойких труб, изготовленных из легированных сталей, намного превышает стоимость обыкновенных труб. Высокая стоимость жаростойких труб и их дефицитность затрудняют пока их использование при изготовлении рекуператоров. Коррозия стальных труб вызывается газами, содержащими O_2, CO_2, SO_2 и H_2O, а также легкоплавкую окись ванадия (V_2O_5), получающуюся при сжигании сернистых мазутов.

Конструктивное решение низкотемпературного рекуператора с подогревом воздуха до 300—400 °С относительно просто. Создание же высокотемпературного рекуператора для подогрева воздуха и газообразного топлива до 700—900 °С представляет серьезную техническую задачу, пока еще полностью не решенную. Сложность ее заключается в обеспечении надежной работы рекуператоров в течение длительной эксплуатации при использовании дымовых газов с высокой температурой, несущих взвешенные твердые частицы золы, сажистого углерода, шихты и т. д., что вызывает абразивный износ. При выпадении этих частиц из потока поверхность нагрева рекуператора со стороны газов загрязняется. При запыленном воздухе поверхность нагрева загрязня-

ется и со стороны воздуха. Отдельные трубки трубных пучков рекуператоров, заделанные в трубные доски, работают по ходу газов в разных температурных условиях, по-разному нагреваются и расширяются. Это

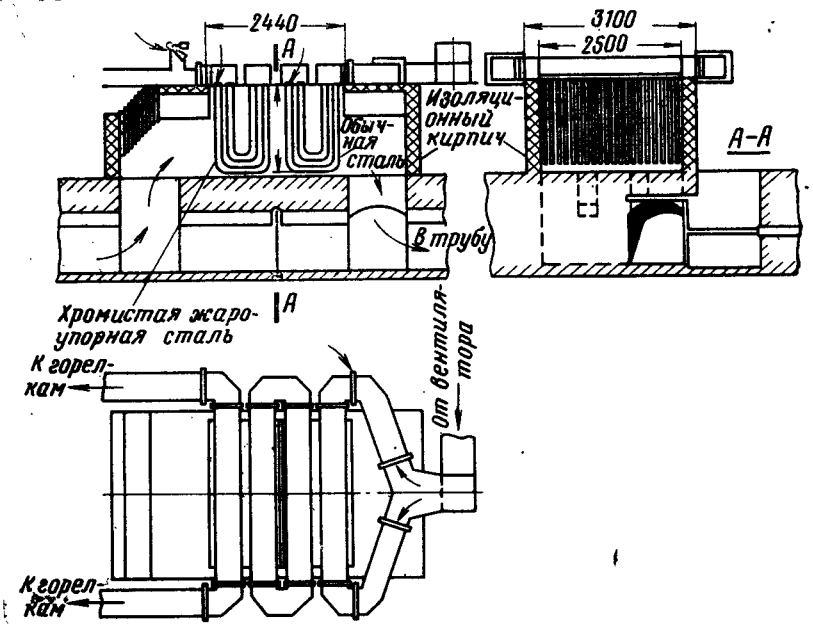


Рис. 7-7. Трубчатый петлеобразный рекуператор для установки на борове (может быть установлен и на своде печи).

различие в расширении труб требует различной их компенсации, что трудно осуществить. На рис. 7-7 показана удачная конструкция трубчатого рекуператора, поверхность нагрева которого состоит из свободно висящих петель, вваренных в коллекторы (коробки). Рекуператор состоит из двух секций, через которые проходит последовательно воздух навстречу дымовым газам, движущимся поперек трубных пучков. Петлеобразный рекуператор имеет хорошую компенсацию тепловых расширений, что является очень важным условием надежной работы.

На рис. 7-8 показана конструкция рекуператора с движением дымовых газов внутри труб и воздуха — снаружи труб в направлении, поперечном к трубному пучку (в два хода). На рисунке условно показана одна трубка. Поскольку трубы удлиняются неодинаково, недостатком конструкции является недостаточно свободное расширение труб. Для защиты нижней трубной доски от лучеиспускания газов и кладки служит предвключенный змеевик, через который с большой скоростью прогоняется воздух.

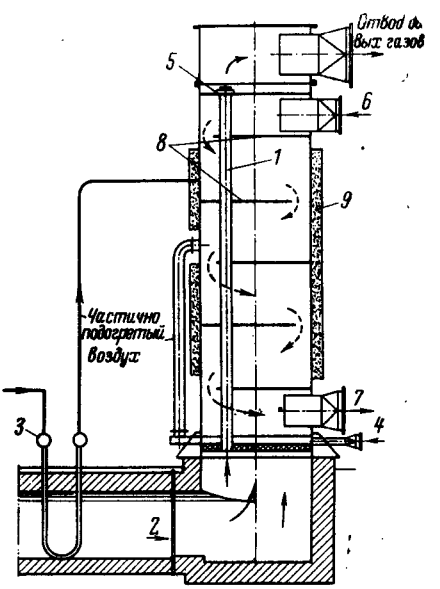


Рис. 7-8. Трубчатый рекуператор для установки рядом с печью.

1 — трубки рекуператора; *2* — подвод дымовых газов; *3* — предвключенная секция; *4* — подача небольшой части холодного воздуха для охлаждения трубной доски; *5* — индивидуальный компенсатор; *6* — подвод холодного воздуха; *7* — отвод горячего воздуха; *8* — перегородки; *9* — кожух с тепловой изоляцией.

На рис. 7-9 изображена принципиальная схема высокотемпературн-

ного радиационного щелевого рекуператора, состоящего из двух стальных цилиндров, образующих концентрический зазор, по которому прогоняется с большой скоростью нагреваемый воздух. Внутри цилиндра движутся раскаленные дымовые газы, лучеиспускающие на поверхность внутреннего цилиндра. Трубчатый радиационный рекуператор показан на рис. 7-9, *б*. Трубчатый рекуператор более надежен в работе, чем щелевой. Преимуществами радиационных рекуператоров являются: меньший расход жаростойкой стали за счет интенсивного лучистого теплообмена в условиях высоких температур газов (800—1 200 °С) и меньшая чувствительность поверхности нагрева к загрязнениям. После радиационного рекуператора должен быть установлен конвективный рекуператор, так как температура газов после радиационного рекуператора еще очень высока.

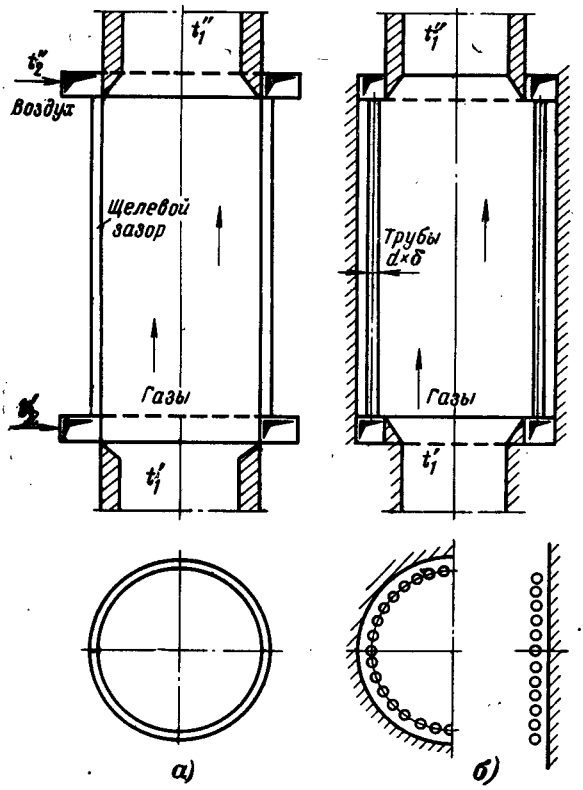


Рис. 7-9. Схемы радиационных стальных рекуператоров.

а — кольцевой (щелевой); *б* — трубчатый с однорядным экраном.

При надежной работе высокотемпературного рекуператора температура металла должна иметь минимальное значение, что достигается увеличением внутренней теплоотдачи от стенок рекуператора к нагреваемому воздуху. Внутренняя теплоотдача усиливается при увеличении скоростей воздуха и при применении вставок в виде полых металлических и керамических стержней (рис. 7-10). Поверхность вставок играет роль косвенной поверхности нагрева: получая тепло лучеиспусканием от горячей стенки труб, вставка отдает его движущемуся воздуху конвективным путем. Интенсификация внутренней теплоотдачи посредством вставок является весьма эффективной. Вставки уменьшают приведенный диаметр трубы до величины $d_{пр}=D-d_{вст}$, что способствует увеличению конвективной теплоотдачи от стенки к воздуху. В условиях низких температур вставки работают неэффективно и их применять нецелесообразно.

На рис. 7-11 показан рекуператор с трубами двойной циркуляции. Холодный воздух сначала проходит через внутренние трубы, а затем через концентрическое пространство труб поступает в коллектор горячего воздуха. Внутренние трубы играют роль косвенной поверхности нагрева.

Трубчатые рекуператоры отличаются большой плотностью и поэтому могут применяться также для подогрева газообразного топлива. Коэффициент теплопередачи может достигать 25—40 *вт*/(*м*^{2}·*град*). Пластинчатые рекуператоры сложнее в изготовлении, менее плотны и

долговечны и применяются редко. Рекуператоры, установленные отдельно от печи, занимают некоторое дополнительное место в помещении цеха, во многих случаях это препятствует их применению, однако часто удается удачно расположить рекуператоры на печи или под печью.

На рис. 7-12 показан элемент (труба) игольчатого рекуператора, отливающегося из легированного чугуна, что позволяет подогревать воз-

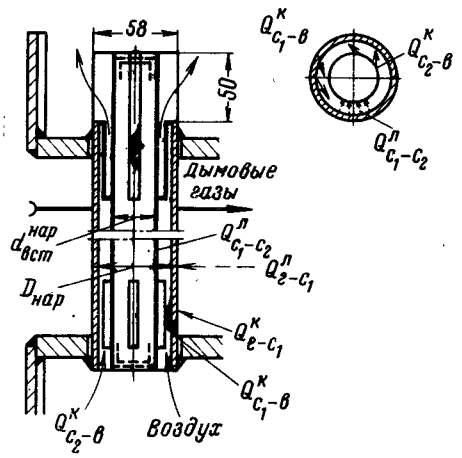


Рис. 7-10. Элемент трубчатого стального рекуператора со вставкой.

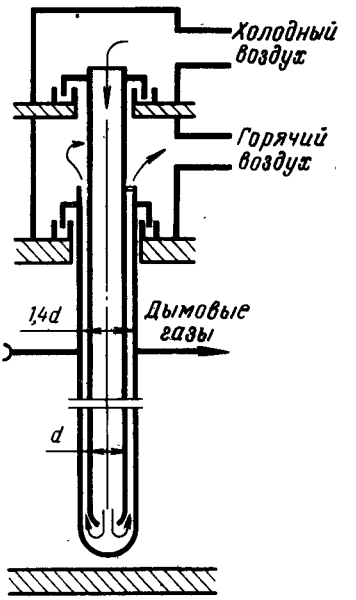


Рис. 7-11. Стальной трубчатый рекуператор с двойной циркуляцией.

дух до 500 °С. В отдельных случаях при более высоком подогреве воздуха (максимально до 800 °С) содержание хрома в чугуне увеличивается до 30%. Преимущество игольчатого рекуператора заключается в эффективной теплопередаче от дымовых газов к воздуху благодаря

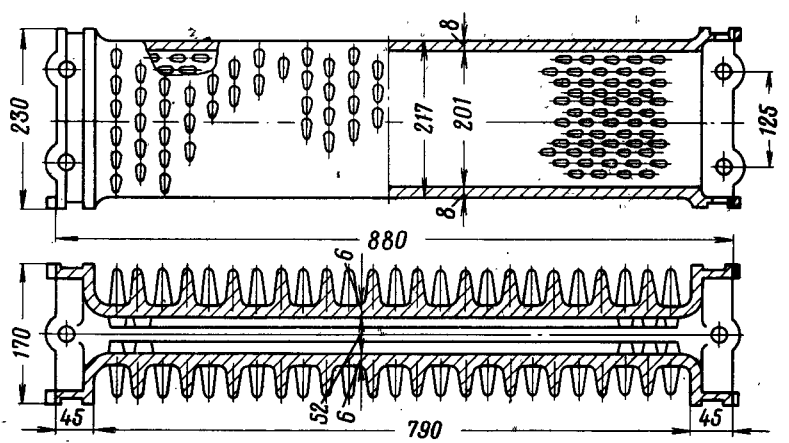


Рис. 7-12. Секция игольчатого рекуператора (труба с иглами на наружной и внутренней сторонах).

увеличению поверхности нагрева за счет большого количества игл, расположенных как с наружной, так и внутренней стороны труб, а также за счет усиления конвективной теплопередачи. Иглы имеют обтекаемую

каплеобразную форму сечения (реже круглую — при конических иглах). Коэффициент теплопередачи, отнесенный к 1 $м^2$ гладкой поверхности секции, называемой условной поверхностью нагрева, достигает 60—80 $вт/(м^2 \cdot град)$.

Игольчатые рекуператоры компактны, что делает их удобными для установки. Недостаток их заключается в засоряемости наружной игольчатой поверхности золой, пылью и пр., а также в недостаточной плотности. Трубы игольчатых рекуператоров делаются длиной от 880 до 2 150 *мм*. Соответственно условная поверхность нагрева одной трубы изменяется от 0,25 до 0,66 $м^2$. Отдельные трубы соединяются между собой в секции при помощи соединительных чугунных реек.

Элементы чугунных рекуператоров с иглами с двух сторон могут применяться только при чистых дымовых газах. Если дымовые газы загрязнены сажистым углеродом, золой, пылью и т. п., то следует применять трубы с иглами только с внутренней стороны. Такие элементы разработаны Стальпроектом и выпускаются серийно. Греющие дымовые газы обтекают трубы снаружи, нагреваемый воздух проходит внутри труб. Оптимальные скорости, отнесенные к 0 °С и 760 *мм рт. ст.*, принимаются: для дымовых газов $w_г^0 = 3 \div 6$ *м/сек* и для воздуха $w_в^0 = 4 \div 10$ *м/сек*. Коэффициенты теплопередачи зависят от скоростей дымовых газов и воздуха, а также от их температур и составляют примерно от 19 до 46 $вт/(м^2 \cdot град)$ (в расчете на условную гладкую поверхность труб).

На трубах с односторонними иглами расстояния между центрами труб значительно меньше, чем у двусторонних труб, а потому в 1 $м^3$ объема таких труб укладывается больше и, несмотря на видимый проигрыш в коэффициенте теплопередачи, габариты рекуператора (при прочих равных условиях) и их стоимость примерно одинаковы [1]. Поверхность нагрева рекуператоров чаще всего включается по схеме «перекрестного противотока».

7-6. РАСЧЕТ РЕКУПЕРАТОРОВ

Расчет рекуператоров ведется на основе двух уравнений: теплового баланса рекуператора и уравнения теплопередачи.

Тепловой баланс рекуператора. Уравнение теплового баланса рекуператора имеет вид:

$$W_г(t'_г - t''_г)\,\varphi_р = W_в(t''_в - t'_в); \qquad (7\text{-}21)$$

здесь $W_г = V_г \bar{c}_г$ и $W_в = V_в \bar{c}_в$ — водяные эквиваленты продуктов горения и воздуха (соответственно); $\varphi_р$ — коэффициент, учитывающий потери тепла в окружающую среду; $V_г$ и $V_в$ — количества продуктов горения и воздуха, $м^3/ч$; $\bar{c}_г$ и $\bar{c}_в$ — их средние объемные теплоемкости в пределах температурных перепадов $t'_г - t''_г$ и $t''_в - t'_в$ (соответственно).

Средняя теплоемкость газов определяется по формуле

$$c_г = \frac{c'_г t'_г - c''_г t''_г}{t'_г - t''_г}. \qquad (7\text{-}21а)$$

Введем безразмерные температуры:

$$\theta_г = \frac{t''_г - t'_в}{t'_г - t'_в} \quad \text{и} \quad \theta_в = \frac{t''_г - t'_в}{t'_г - t'_в}. \qquad (7\text{-}22)$$

Тогда уравнение (7-21), если разделить левую и правую части его на $W_в(t'_г - t'_в)$, можно переписать в безразмерном виде:

$$\frac{t''_в - t'_в}{t'_г - t'_в} = \frac{W_г}{W_в}\,\varphi_р\left(1 - \frac{t''_г - t'_в}{t'_г - t'_в}\right) \qquad (7\text{-}23)$$

[1] Подробно об игольчатых и других рекуператорах см. в книге Б. П. Тебенькова «Рекуператоры для промышленных печей». М., «Металлургия», 1969.

или $$\theta_в = W(1-\theta_г)\varphi_р, \qquad (7\text{-}24)$$

где $W = W_г/W_в$.

Коэффициент регенерации

$$r = \frac{W_в(t''_в - t'_в)}{W_г(t'_г - t'_в)} = \frac{\theta_в}{W} = (1-\theta_г)\varphi_р. \qquad (7\text{-}25)$$

По уравнению (7-23) построен график $\theta_в = f(\theta_г)$ (рис. 7-13). На оси абсцисс нанесена шкала для определения коэффициента регенерации r. На графике указана граница параллельного тока и противотока. При расчете количество газов необходимо брать с учетом выбивания газов через рабочие окна.

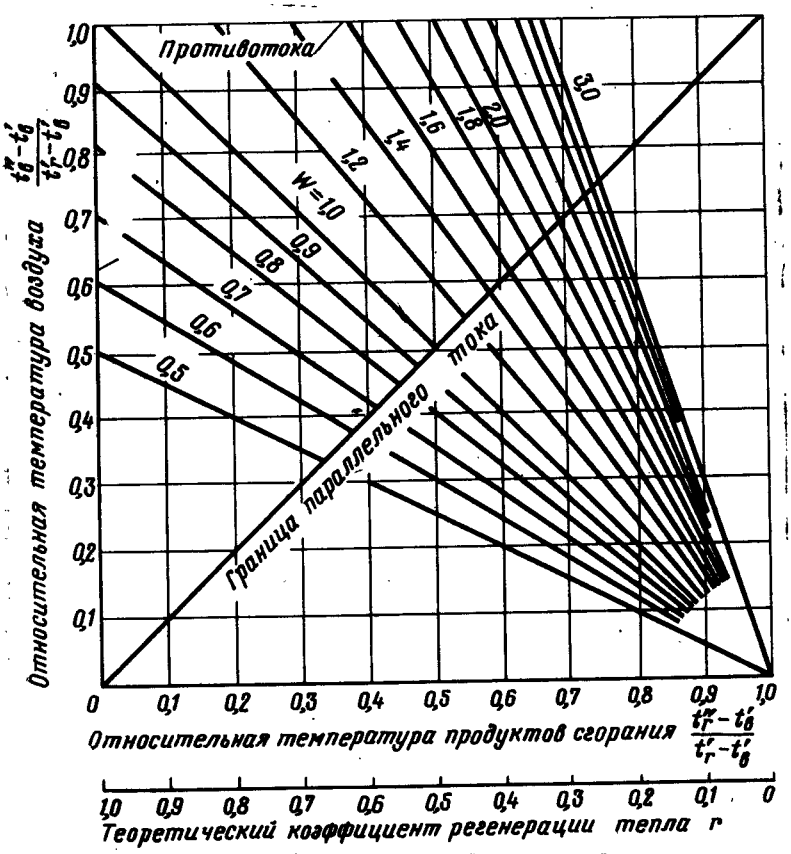


Рис. 7-13. Зависимость между начальной и конечной температурами в теплообменнике.

Пример. Определнть температуру газов на выходе из рекуператора $t''_г$, если дано: количество газов $V_г = 64\,400$ *м³/ч*, колнчество воздуха $V_в = 54\,200$ *м³/ч*, температура воздуха $t'_в = 20$ °С, $t''_в = 400$ °С, начальная температура газов $t'_г = 350$ °С. Коэффициент потерь тепла $\varphi_р = 0{,}97$. Средние теплоемкости: $c_г = 1{,}44$ *кдж/(м³ · град)*, $c_в = 1{,}32$ *кдж/(м³ · град)*.

Находим отношение водяных эквивалентов:

$$W = \frac{W_г}{W_в} = \frac{64\,400 \cdot 1{,}44}{54\,200 \cdot 1{,}32} = 1{,}31.$$

Безразмерная температура воздуха

$$\theta_в = \frac{t''_в - t'_в}{t'_г - t'_в} = \frac{400-20}{450-20} = 0{,}89.$$

По графику рис. 7-13 находим $\theta_г = 0{,}31$, отсюда

$$t''_г = \theta_г(t'_г - t'_в) + t'_в = 0{,}31(450-20) + 20 = 153\ °С.$$

Поверхность нагрева конвективного рекуператора находим из уравнения теплопередачи

$$F=\frac{Q}{k\Delta t},\ м^2; \qquad (7\text{-}26)$$

здесь Q — количество тепла, отдаваемое газами воздуху; k — коэффициент теплопередачи от газов к воздуху; Δt — средняя логарифмическая разность температур.

Коэффициент теплопередачи находится для металлических рекуператоров по формуле

$$k=\xi\frac{\alpha_1\alpha_2}{\alpha_1+\alpha_2},\ вт/(м^2\cdot град), \qquad (7\text{-}27)$$

где α_1 и α_2 — коэффициенты теплоотдачи соответственно от греющей среды к стенке и от стенки к воздуху, $вт/(м^2\cdot град)$; ξ — коэффициент использования, учитывающий неполноту омывания поверхности и ее загрязнение.

Значения α_1 и α_2 определяются по формулам из курса теплопередачи или из специальных руководств.

Расчет радиационного рекуператора. После определения температуры газов на выходе из рекуператора находят количество тепла, переданного воздуху по формуле

$$Q_в=V_вc_в(t''_в-t'_в). \qquad (7\text{-}28)$$

Это тепло передается от газов лучеиспусканием в количестве $Q^л_{г-c_1}$ и конвекцией в количестве $Q^к_{г-c_1}$:

$$Q_в=Q^л_{г-c_1}+Q^к_{г-c_1}=C_0\varepsilon_тH_л\xi\left(\frac{T'_г}{100}\right)^4\Delta_1+F\alpha_к(t_г-t_с)_{ср}; \qquad (7\text{-}29)$$

здесь $\varepsilon_т$ — степень черноты теплообменной камеры, определяемая по методике, изложенной в гл. 5; $H_л$ — лучевоспринимающая поверхность радиационного рекуператора. Для трубчатой поверхности $H_л=\Sigma F_{обм}x$, $м^2$; $F_{обм}$ — площадь стен, покрытых воздушным экраном, $м^2$; x — угловой коэффициент, определяемый по методике [Л. 14] в зависимости от шага труб s/d; Δ_1 — среднеэффективная разность безразмерных температур, ξ — условный коэффициент загрязнения; F — полная поверхность воздушного экрана, $м^2$; $\alpha_к$ — коэффициент конвективной теплоотдачи, $вт/(м^2\cdot град)$; $(t_г-t_с)_{ср}$ — средняя разность температур между газами и стенкой.

$$\Delta_1=\sqrt{(1-\theta^4_{с''})(\theta^4_{г''}-\theta^4_{с'})}, \qquad (7\text{-}30)$$

где $\theta'_с=T'_с/T'_г$ и $\theta''_с=T''_с/T'_г$ — безразмерные температуры стенок труб на входе и выходе; $T'_г$ — абсолютная температура газов на входе в рекуператор.

Температуры стенки определяются жаростойкостью стали. Например, трубы из стали ЭЯ1Т (Х18Н10Т) имеют жаростойкость 800 °С. Трубы из более жаропрочной стали имеют жаростойкость 850—900 °С (заводские марки ЭИ240, ЭИ812 и др.). Поэтому температура металла в горячей части труб не должна быть выше $T''_с=800+273=1\,073$ °К и минимальная — не выше $T'_с=700+273=973$ °К Скорость воздуха выбирается высокой $w_в=20\div40$ $м/сек$ с тем, чтобы обеспечить отвод тепла, переданного от греющих газов.

Радиационные рекуператоры со вставками (рис. 7-10) рассчитываются по формулам

$$Q_в=Q^л_{г-c_1}+Q^к_{г-c_1}=Q^к_{c_1-в}+Q^к_{c_2-в}, \qquad (7\text{-}31)$$

и

$$Q^{л}_{c_1-c_2}=Q^{к}_{c_2-в}; \qquad (7\text{-}31')$$

здесь $Q^{л}_{г-c_1}$ — количество тепла, переданное от газов к стенке лучеиспусканием; $Q^{к}_{г-c_2}$ — количество тепла, переданное от газов к стенке конвекцией; $Q^{к}_{c_1-в}$ — количество тепла, переданное конвекцией воздушному потоку от стенки c_1; $Q^{к}_{c_2-в}$ — количество тепла, переданное конвекцией от стенки c_2 воздуху; $Q^{л}_{c_1-c_2}$ — количество тепла, переданное лучеиспусканием от стенки c_1 стенке c_2.

Из уравнений (7-31) и (7-31′) находят температуры t_{c_1} и t_{c_2}, определяя каждый член этих уравнений по методике [Л.5].

Определение температуры стенки и выбор марки стали. Радиационный высокотемпературный трубчатый воздухоподогреватель большой производительности был испытан во ВТИ [Л. 22] и устойчиво работал, подогревая воздух от 500 до 700 °С. В качестве топлива использовалась угольная пыль подмосковного угля, сжигаемая с коэффициентом избытка воздуха $\alpha=1{,}3$ в пространстве с экранированными воздушными экранами из труб 40×4 *мм* с относительным шагом $s/d=1{,}5$. Трубы из аустенитной стали устойчиво работали с температурами стенки, близкими к рассчитанным по формуле:

$$t_c=t_в+\mu\beta q_{мест}\left(\frac{1}{\alpha_в}+\frac{2}{1+\beta}\frac{\delta}{\lambda}\right); \qquad (7\text{-}32)$$

здесь $t_в$ — средняя температура воздуха на рассчитываемом участке; μ — коэффициент растечки тепла [Л. 14]; $q_{мест}$ — максимальная тепловая нагрузка, определяемая по формуле:

$$\beta=\frac{d}{d-2\delta}, \qquad (7\text{-}33)$$

где d — наружный диаметр, *м*; δ — толщина стенки, *м*;

$$q_{мест}=\sigma q_{ср}=\sigma\frac{Q}{H_л},\ квт/м^2, \qquad (7\text{-}34)$$

где σ — коэффициент неравномерности; Q — суммарное количество тепла, полученное воздухом; $H_л$ — лучевоспринимающая поверхность, $м^2$; $\alpha_в$ — коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху [Л. 5].

Максимальная местная температура металла труб при номинальной нагрузке не превышала 775 °С, что для аустенитной высоколегированной стали допустимо.

Марка стали выбирается по наибольшей температуре стенки рекуператора.

7-7. РЕГЕНЕРАТИВНЫЕ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛИ, ПРЕДЛАГАЕМЫЕ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВА ВОЗДУХА

В последние годы предложены, описанные в [Л. 20, 21, 24 и др.], регенеративные теплообменники непрерывного действия с подвижной насадкой, которые можно классифицировать следующим образом: 1) дробепоточные — с пересыпающимися полками; 2) с насадкой в виде «кипящего» слоя; 3) с падающей иасадкой — со свободным падением и с тормозящими полками; 4) вращающиеся воздухоподогреватели.

Ниже приведены некоторые характерные схемы конструкций.

В дробепоточном регенеративном теплообменнике, разработанном автором (рис. 7-14), дробь разного материала и размера (чаще ∅ 5—7 *мм*) медленно опускается под действием силы тяжести через канал прямоугольного сечения, выполненный из жаростойкой сетки, легко продуваемой газами или воздухом. Тонкий слой дроби продувается в верхней части теплообменника греющими газами, в нижней части — воздухом. Таким образом, в верхней части дробь нагревается, а в нижней части она отдает тепло воздуху. Перепускная труба с автоматическим клапаном, заполненная дробью, отделяет газовую часть от воздушной. Дробь из нижней части теплообменника подается наверх элеватором. Для повышения эффективности теплообменник имеет противоточную схему в два хода по газам. В дробепоточном воздухоподогревателе Е. И. Кашунина в качестве насадки используются дробь и гравий; жалюзийные стенки вместо сетчатых кассет [Л. 21].

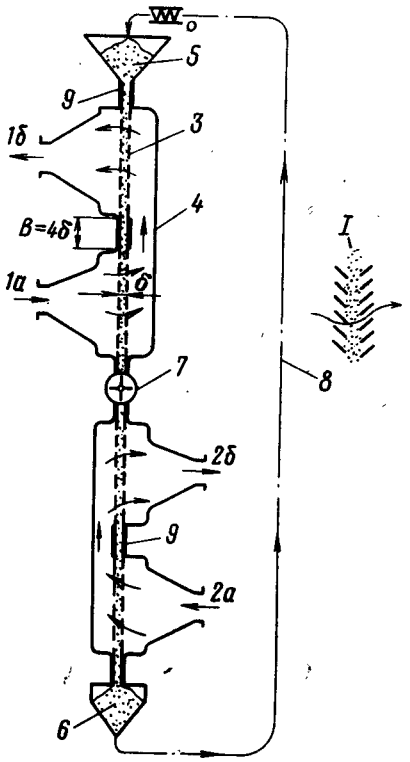


Рис. 7-14. Дробепоточный двухходовой воздухоподогреватель.

1а и *1б* — вход и выход газов; *2а* и *2б* — вход и выход воздуха; *3* — сетчатая кассета; *4* — корпус газовой камеры; *5* — загрузочный бункер; *6* — приемный бункер; *7* — перепускной клапан; *8* — возврат дроби; *9* — уплотняющие приспособления; *I* — вариант жалюзийных стенок (вместо сеток) по Е. И. Кашунину.

Скорость насадки определяется количеством дроби, подогреваемой в единицу времени, условиями теплообмена и компоновкой теплообменника. Во избежание выноса твердых частиц потоком скорость газов или воздуха должна быть значительно меньше скорости витания дроби.

На рис. 7-15 показан воздухоподогреватель с промежуточным теплоносителем в виде сыпучего или кускового материала, рассчитанный на высокий подогрев воздуха — до 1 000 °С и более. Слой промежуточного теплоносителя продувается вверху горячими газами, а внизу — нагревающимся воздухом, движущимся в поперечном направлении. Большое расстояние между потоками исключает переток воздуха и газов. Экспериментальный теплообменник такого типа испытан в СССР и показал свою пригодность [Л. 24].

Регенеративный воздухоподогреватель с падающей насадкой показан на рис. 7-16 [Л. 5]. Сыпучая насадка равномерно распределяется по сечению шихты и свободно падает вниз навстречу греющим газам, движущимся противоточно со скоростью, меньшей скорости витания частиц (выноса частиц из шахты быть не должно). Нагретая насадка переходит по трубе вниз, в воздушную камеру, где опять распределяется равномерно по сечению и, падая навстречу воздуху нагревает его. Насадка после падения собирается под воздушной камерой и вновь возвращается в газовую камеру ковшовым элеватором или пневматическим путем. Описываемый воздухоподогреватель работает по схеме противотока, но, как и в теплообменниках других типов, в нем может быть применен прямоток; в таком случае частицы теплоносителя транспортируются наверх. Длительность нагревания частиц в каме-

ре определяется временем пребывания в ней частиц и, стало быть, невелика и измеряется секундами. Для того чтобы увеличить это время, применяют тормозящие полки [Л. 24], расположенные в камере под разными углами к горизонту. Примером может служить камера, изображенная на рис. 7-16.

Промежуточное положение между воздухоподогревателями с плотным (неподвижным) слоем и взвешенным слоем занимают воздухопо-

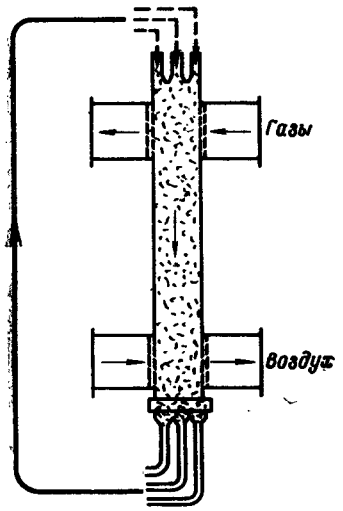


Рис. 7-15. Высокотемпературный воздухоподогреватель с поперечно-продуваемым слоем промежуточного теплоносителя.

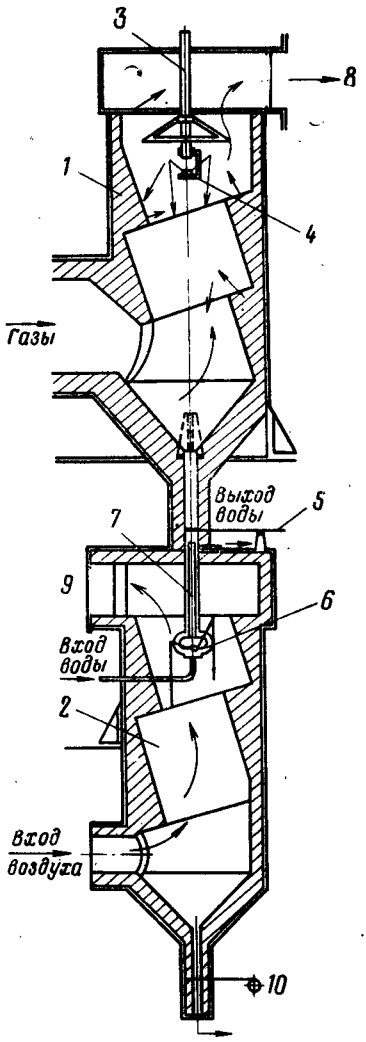


Рис. 7-16. Схема воздухоподогревателя с насадкой, падающей на тормозящие полки.

1 — газовая камера; *2* — воздушная камера; *3* — ввод сыпучего теплоносителя; *4* — разбрасыватель; *5* — перепускной клапан; *6* — разбрасыватель горячего теплоносителя; *8* — отвод газов; *9* — отвод горячего воздуха; *10* — возврат теплоносителя.

догреватели с **«кипящим»** (псевдоожиженным) слоем; принцип действия их показан на рис. 7-17, где изображен четырехступенчатый воздухоподогреватель [Л. 5]. Скорость потока, соответствующая переходу слоя в псевдоожиженное состояние, зависит от плотности, размера и формы зерен, а также от вязкости и плотности газа. По своим свойствам «кипящий» слой напоминает маловязкую жидкость и в первом приближении подчиняется законам гидродинамики.

Преимущества и недостатки регенеративных воздухоподогревателей с подвижной сыпучей насадкой. Теоретически преимущества описанных выше регенеративных воздухоподогревателей заключаются, во-первых, в интенсивной теплопередаче, их простом устройстве и малых затратах на сооружение и, во-вторых, в возможности высокотемпературного нагрева воздуха — вплоть до 800 °С и более. Высокотемпературный нагрев воздуха — очень важное преимущество, ради которого и предпринимаются в настоящее время

исследования (высокотемпературный нагрев воздуха в рекуперативных теплообменниках из легированных сталей, как известно, связан с затратами дорогостоящих металлов и с затруднениями в эксплуатации). Затраты энергии на преодоление сопротивлений газовых и воздушных потоков в теплообменниках с падающим слоем невелики, но являются существенными в теплообменниках с «кипящим» слоем, а также в дробепоточных. Серьезным недостатком описанных выше типов является абразивный износ и запыление газов и воздуха от истирания насадки, что затрудняет их практическое использование.

Вращающиеся регенеративные воздухоподогреватели. Для низкотемпературного подогрева воздуха (до 250—350 °С) в котельных установках применяется воздухоподогреватель типа Юнгстрем. Для высокотемпературного нагрева воздуха предназначается вращающийся воздухоподогреватель роторного типа, разработанный автором книги (рис. 7-18). Ротор представляет собой цилиндр с двойной сетчатой стенкой (сваренной из жароупорной проволоки), заполненной чугунной дробью или другой регенеративной насадкой. Ротор медленно вращается вокруг вертикальной оси (ротор вала может и не иметь), и через газопроницаемые стенки фильтруются греющие газы или нагреваемый воздух. Между газовой и воздушной камерами имеют-

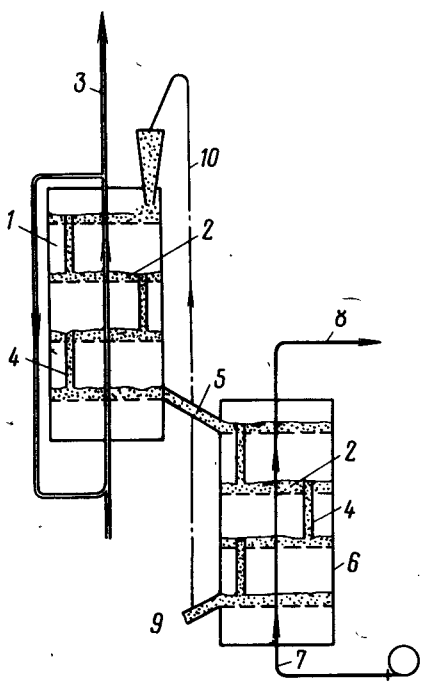


Рис. 7-17. Схема воздухоподогревателя с «кипящим» слоем промежуточного теплоносителя.

1 — корпус газовой камеры; *2* — полки из жароупорного бетона или поддерживающие решетки; *3* — отвод продуктов сгорания; *4* — перепускные трубки; *5* — перепускной канал (с регулятором); *6* — корпус воздушной камеры; *7* — подача холодного воздуха; *8* — отвод горячего воздуха; *9* — сборник для возврата теплоносителя; *10* — ковшовый элеватор.

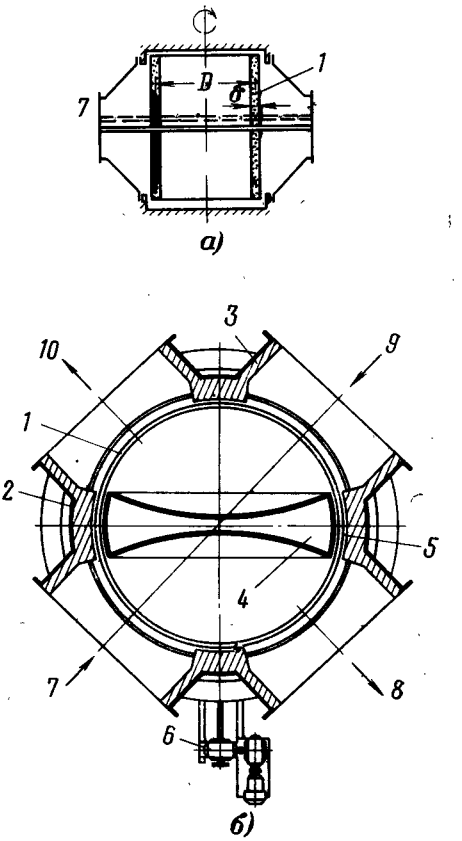


Рис. 7-18. Принципиальная схема вращающегося роторного воздухоподогревателя.

а — схема воздухоподогревателя; *б* — поперечное сечение; *1* — ротор с набивкой из шариков; *2* — статор (кожух); *3* — футеровка; *4* — перегородка неподвижная; *5* — уплотнения; *6* — привод ротора; *7* — воздух холодный; *8* — воздух горячий; *9* — горячие газы; *10* — охлажденные газы.

ся неподвижные перегородки с уплотнительными устройствами. Поскольку между воздухом и газом имеется обычно значительная разность давлений, надежность работы роторного воздухоподогревателя определяется хорошей конструкцией уплотнительного устройства. Роторный воздухоподогреватель рассчитан на небольшую производительность, поскольку его поверхность обдувания не может быть большой.

Связь между поверхностью нагрева сыпучей насадки и ее объемом. Если принять, что насадка состоит из идеальных шариков с диаметром $d_э$, то количество шариков в ней при массе насадки $G_т$, *кг*, будет:

$$n = \frac{G_т}{\frac{\pi d_э^3}{6}\rho}. \tag{7-35}$$

Полная наружная поверхность насадки

$$F = n\pi d_э^2 = \frac{6G_т}{d_э\rho} = \frac{6}{d_э} V_т(1 - \varepsilon); \tag{7-36}$$

здесь F — полная поверхность насадки, *м*^{2}; $V_т$ — объем насадки (полный), *м*^{3}; $d_э$ — эквивалентный диаметр частицы, *м* (для шариков $d_э = d$, для других частиц можно принять $d_э = 0{,}75\,d$); ρ — плотность частиц, *кг/м*^{3}; ε — порозность насыпного слоя, т. е. относительный свободный объем, заполненный газами, определяемый по формуле

$$\varepsilon = \frac{V_т - V_{част}}{V_т} = 1 - \frac{\rho_т}{\rho}, \tag{7-37}$$

где $\rho_т$ — насыпная плотность насадки, *кг/м*^{3}; объем, занимаемый частицами насадки,

$$V_{част} = (1 - \varepsilon)\, V_т. \tag{7-38}$$

Порозность для идеальных шариков $\varepsilon = 0{,}5 = \text{const}$, в других случаях она может изменяться в зависимости от формы частиц в больших пределах ($\varepsilon = 0{,}4 \div 0{,}6$).

Если считать, что в регенеративном теплообменнике для передачи необходимого количества тепла требуется поверхность F, *м*^{2}, а время пребывания частиц (время нагрева или охлаждения) обозначить τ, *сек*, то количество насадки, находящейся в аппарате, будет:

$$g = \frac{\tau G_т}{3\,600} = \frac{F d_э \rho}{6}, \ кг, \tag{7-39}$$

откуда время пребывания частицы

$$\tau = \frac{600 F d_э \rho}{G_т}, \ сек. \tag{7-40}$$

Поверхность F определяется по условиям теплообмена. Количество циклов (оборотов) будет:

$$n = \frac{G_т}{g} \quad \text{или} \quad n = \frac{60}{\tau} \ об/мин. \tag{7-41}$$

7-8. РАСЧЕТ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ

Расчет регенеративных воздухоподогревателей с зернистой насадкой как дробепоточных, так и с падающей насадкой выполняется на основании двух уравнений: теплового баланса и теплообмена. Расчет ве-

дется последовательно для газовой и воздушной камер, для которых уравнения теплообмена будут иметь вид:

$$Q_г = \alpha_1 F_г (t_г - t^г_н); \quad (7\text{-}42)$$

$$Q_в = \alpha_2 F_в (t^в_н - t_в), \quad (7\text{-}43)$$

где $Q_г$ и $Q_в$ — количество тепла, отданное газами и воспринятое воздухом; α_1 и α_2 — коэффициенты теплоотдачи от газов к поверхности нагрева и от поверхности нагрева к воздуху, определяемые по методике, изложенной выше, *вт/(м² · ч · град)*; $F_г$ и $F_в$ — соответственно поверхности нагрева, омываемые газами и воздухом, *м²*; $t_г$ и $t_в$ — средняя температура газов и воздуха, °С; $t^г_н$ и $t^в_н$ — средняя температура поверхности нагрева на газовой и воздушной сторонах, °С.

Примеры расчетов приведены в пособии [Л. 5].

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

8-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Под вторичными энергетическими ресурсами понимаются: тепло продуктов горения, покидающих печи с относительно высокой температурой, тепло шлаков, удаляемых из плавильных печей с высокой температурой, тепло жидкости (воды и других жидких теплоносителей) или парожидкостной эмульсии, охлаждающей металлические детали в горячих местах печей; тепло горячих материалов, выходящих из печей; тепло кладки остывающих печей периодического действия и т. д. Тепло продуктов горения включается в состав вторичных энергетических ресурсов только после регенеративных устройств печи (регенераторов и рекуператоров), так как регенерация тепла является необходимой внутренней и неотъемлемой частью технологического процесса. Ко вторичным энергетическим ресурсам иногда относят и химическую энергию низкокалорийных колошниковых газов (ваграночные газы и низкокалорийные газообразные отходы производств). Коксовый и доменный газы обычно рассматриваются как сопутствующие продукты коксодоменных цехов и не относятся к вторичным энергетическим ресурсам. Низкопотенциальные энергетические ресурсы (тепло отработанного пара и т. п.) здесь не рассматриваются. Ниже, в гл. 11, приводится пример использования вторичных энергетических ресурсов — использование тепла раскаленного кокса, выдаваемого из коксовых печей. В настоящее время котлы-утилизаторы являются необходимой частью установок мартеновских печей, трубчатых печей для нефтепереработки и т. д. Ниже дается характеристика котлов-утилизаторов, применяемых в промышленности.

8-2. КОТЛЫ-УТИЛИЗАТОРЫ

Тепло дымовых газов, уходящих из печей, кроме подогрева воздуха и газообразного топлива, может быть использовано в котлах-утилизаторах для выработки водяного пара. В то время как подогретые газ и воздух используются в самом печном агрегате, пар направляется внешним потребителям (для производственных и энергетических нужд).

Во всех случаях следует стремиться к наибольшей регенерации тепла, т. е. к возвращению его в рабочее пространство печи в виде тепла

нагретых компонентов горения (газообразного топлива и воздуха). В самом деле, увеличение регенерации тепла ведет к сокращению расхода топлива и к интенсификации и улучшению технологического процесса. В печах, оборудованных рекуператорами с глубоким охлаждением дымовых газов (до 150—250 °С), например во многих печах для нагрева металла, отпадает необходимость в дополнительном использовании. Однако наличие рекуператоров или регенераторов не всегда исключает возможность установки котлов-утилизаторов. В первую же очередь котлы-утилизаторы нашли применение в крупных печах с относительно вы-

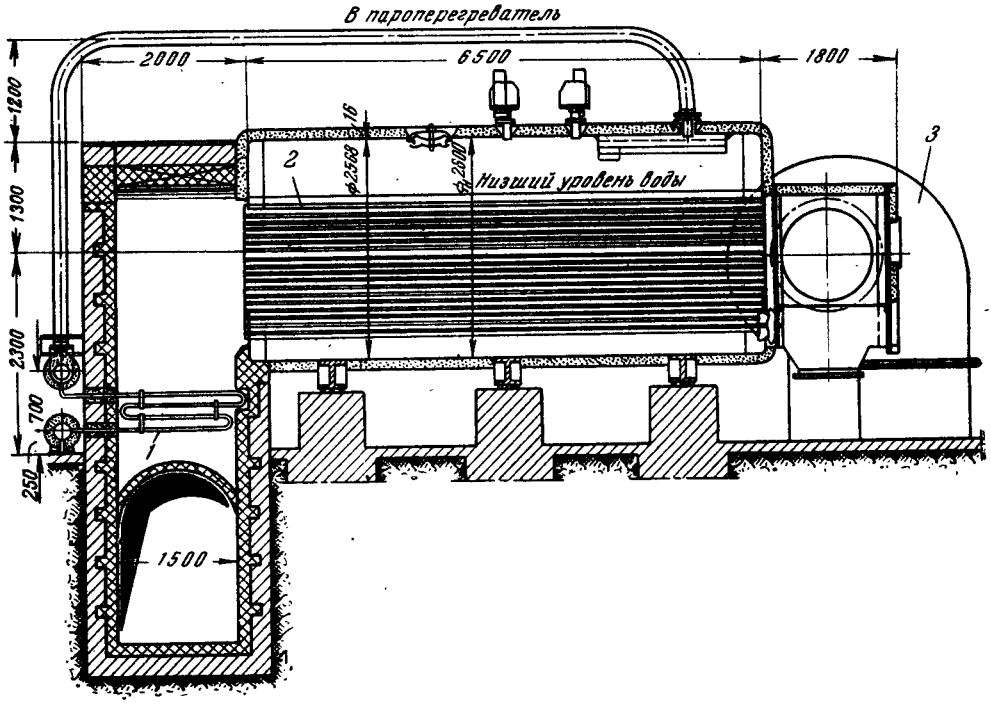


Рис. 8-1. Газотрубный котел-утилизатор ТКЗ типа КУ-40.
1 — пароперегреватель; *2* — трубная поверхность; *3* — дымосос.

сокой температурой отходящих дымовых газов: в мартеновских сталеплавильных печах, в медеплавильных отражательных печах, во вращающихся печах для обжига цементного клинкера, при сухом способе производства цемента и т. д.

Тепло дымовых газов, отходящих от регенераторов мартеновских печей с температурой 500—650 °С, используется в газотрубных котлах-утилизаторах с естественной циркуляцией рабочего тела. Поверхность нагрева газотрубных котлов состоит из дымогарных труб, внутри которых проходят дымовые газы со скоростью примерно 20 *м/сек*. Тепло от газов к поверхности нагрева передается путем конвекции, а потому увеличение скорости повышает теплопередачу. Газотрубные котлы просты в эксплуатации, при монтаже не требуют обмуровки и каркасов и обладают высокой газоплотностью.

На рис. 8-1 показан газотрубный котел Таганрогского завода средней производительности $D_{ср}=5{,}2$ *т/ч* с расчетом на пропуск дымовых газов до 40 000 *м³/ч*. Давление пара, вырабатываемого котлом, равно 0,8 *Мн/м²;* температура 250 °С. Температура газов до котла 600 °С, за котлом 200—250 °С.

В котлах с принудительной циркуляцией поверхность нагрева составляется из змеевиков, расположение которых не ограничивается усло-

виями естественной циркуляции, и поэтому такие котлы компактны. Змеевиковые поверхности изготовляются из труб малого диаметра, например $d=32\times3$ *мм*, что облегчает вес котла. При многократной циркуляции, когда кратность циркуляции составляет 5—18, скорость воды в трубках значительна, не менее 1 *м/сек*, вследствие чего в змеевиках уменьшается выпадение из воды растворенных солей, а кристаллическая накипь смывается. Тем не менее котлы должны питаться водой, химически очищенной при помощи катионитовых фильтров и других способов водоподготовки, соответствующей нормам питательной воды для обычных паровых котлов.

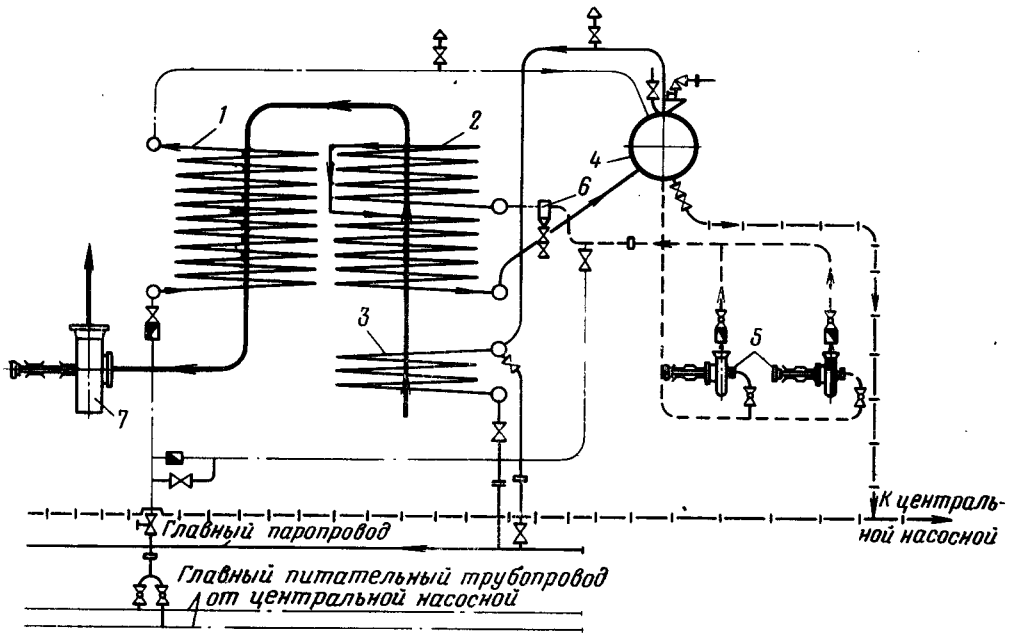


Рис. 8-2. Схема котла-утилизатора с многократной принудительной циркуляцией.
1 — экономайзерная поверхность; *2* — испарительная поверхность; *3* — пароперегреватель; *4* — барабан-коллектор; *5* — циркуляционный насос; *6* — шламоуловитель; *7* — дымосос.

На рис. 8-2 дана схема размещения змеевиковых поверхностей нагрева в вертикальных дымоходах. Движение пароводяной смеси осуществляется циркуляционным насосом. Расположение поверхностей нагрева представлено в поперечном разрезе на рис. 8-3. Конструкции котлов подобного типа разработаны Центроэнергочерметом и Гипромезом и изготовляются на расходы дымовых газов до 50—125 тыс. $м^3/ч$ со средней паропроизводительностью от 5 до 18 *т/ч*.

Стоимость пара составляет 0,4—0,5 *руб/т* вместо 1,2—2 *руб/т* у пара, отобранного из паровых турбин ТЭЦ и 2—3 *руб/т* у пара от промышленных котельных. Стоимость пара составляется из затрат на энергию для привода дымососов, расходов на приготовление воды, амортизацию, ремонт и обслуживание. Скорость газов в котле составляет от 5 до 10 *м/сек*, что обеспечивает хорошую теплопередачу. Аэродинамическое сопротивление газового тракта составляет 0,5—1,5 $кн/м^2$, поэтому агрегат должен иметь искусственную тягу от дымососа. Усиление тяги, которым сопровождается установка котлов-утилизаторов, как правило, улучшает работу мартеновских печей. Подобные котлы получили распространение на заводах, но для их хорошей работы требуется защита поверхностей нагрева от заноса пылью и частицами шлака и систематическая очистка поверхностей нагрева от уноса посредством обдувки перегретым

паром, промывки водой (при остановках котла), вибрационным путем и др.

Для использования тепла дымовых газов, отходящих от медеплавильных отражательных печей, устанавливаются водотрубные котлы с естественной циркуляцией. Дымовые газы в этом случае имеют очень высокую температуру (1 100—1 250 °С) и загрязнены пылью в количестве до 100—200 *г/м*³, причем часть пыли имеет высокие абразивные (истирающие) свойства, другая часть находится в размягченном состоянии и может шлаковать поверхность нагрева котла. Именно большая запыленность газов и заставляет пока отказываться от регенерации тепла в этих печах и ограничиваться использованием дымовых газов в котлах-утилизаторах.

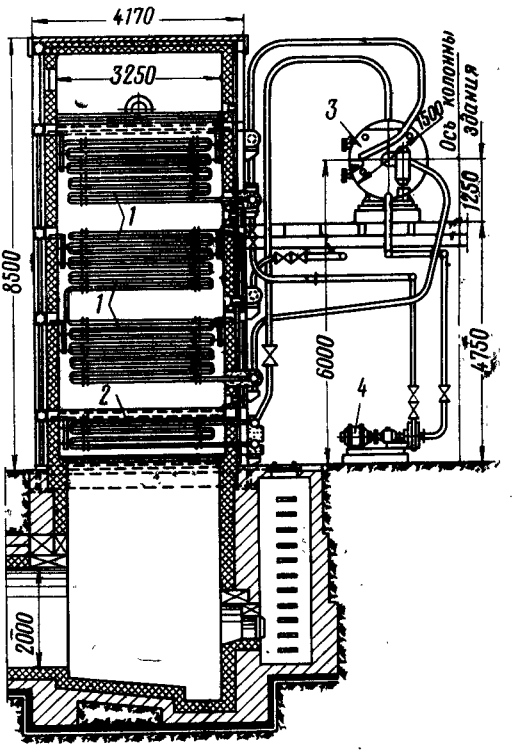


Рис. 8-3. Поперечный разрез котла-утилизатора КУ-80.

1 — испарительная поверхность; *2* — пароперегреватель; *3* — барабан; *4* — циркуляционный насос.

На рис. 8-4 показан двухбарабанный котел-утилизатор с естественной циркуляцией, имеющий экранированный шлакогранулятор и конвективные поверхности нагрева, размещенные в двух газоходах.

Передача тепла от газов к экранным испарительным поверхностям протекает очень интенсивно, благодаря чему обеспечивается интенсивное парообразование Частицы шлака, охлаждаясь, гранулируются и выпадают в шлаковую воронку, чем исключается шлакование конвективной поверхности нагрева котла. Установка подобных котлов для использования газов с относительно невысокой температурой (500—700 °С) нецелесообразна из-за слабой теплопередачи лучеиспусканием.

В случае оборудования высокотемпературных печей металлическими рекуператорами котлы-утилизаторы целесообразно устанавливать непосредственно за рабочими камерами печей. В этом случае в котле температура дымовых газов понижается до 1 000—1 100 °С. С такой температурой они уже могут быть направлены в жароупорную секцию рекуператора. Если газы несут много пыли, то котел-утилизатор устраивается в виде экранного котла-шлакогранулятора, что обеспечивает сепарацию уноса из газов и облегчает работу рекуператора.

8-3. РАСЧЕТ КОТЛОВ-УТИЛИЗАТОРОВ

Обычно при расчете котлов-утилизаторов заданными являются количество топлива, сжигаемого в печи, и температура дымовых газов, уходящих из печи. Температурой дымовых газов, уходящих из котла, задаются.

Паропроизводительность котла-утилизатора определяется из следующего уравнения теплового баланса (без учета продувки котла):

$$B(I'_к — I''_к)\varphi_к(1—\sigma) = D(i_п — i_{п.в}) = Q_{пар}, \qquad (8\text{-}1)$$

где B — часовой расход топлива, *кг/ч* или *м³/ч*; $1-\sigma$ — доля газов, проходящих через котел (от всего количества дымовых газов); σ — доля газов, выбивающихся из печи через неплотности; $I'_к$ и $I''_к$ — энтальпия дымовых газов перед котлом и после него (соответственно); $\varphi_к$ — коэффициент, учитывающий потери тепла газами в окружающую среду; D — паропроизводительность котла, *кг/ч*; $i_п$ — энтальпия пара; $i_{п.в}$ — энтальпия питательной воды; $Q_{пар}$ — тепло, воспринятое поверхностями нагрева котла. Оно складывается из тепла, воспринятого испарительной поверхностью $Q_{исп}$, пароперегревателем $Q_{п.п}$ и экономайзером $Q_{эк}$.

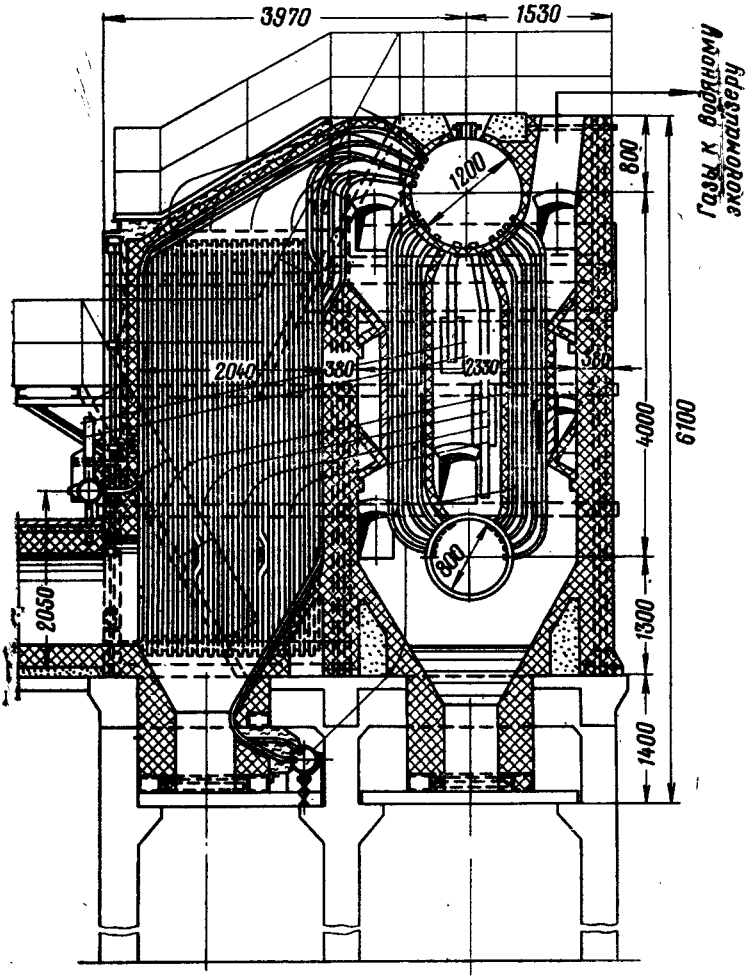


Рис. 8-4. Котел-утилизатор для медеплавильных отражательных печей.

Испарительная поверхность нагрева котла определяется по формуле

$$F = \frac{Q_{исп}}{k\Delta t},\ м^2. \qquad (8\text{-}2)$$

где k — коэффициент теплопередачи от дымовых газов к воде или пару, рассчитанный обычным способом; Δt — средняя логарифмическая разность температур между дымовыми газами и рабочим веществом.

При наличии пароперегревателя и экономайзера они рассчитываются отдельно по аналогичным формулам.

Некоторые металлические элементы конструкции печи, работающие в условиях высоких температур, для увеличения их стойкости и надежности в эксплуатации имеют искусственное охлаждение. Например, в доменных печах охлаждают дутьевые фурмы и гарнитуры горновой зоны; в мартеновских печах охлаждают кессоны (кессон — металлическая конструкция, поддерживающая кладку газового сопла), фурмы, рамы и заслонки рабочих окон и подпятовые балки.

До недавнего времени охлаждение производилось проточной водой при нагревании ее не выше 30—40 °С с повышением ее температуры всего на 6—15 °С. Потери тепла с водой были очень велики и составляли, например, для мартеновских печей до 15—25% всего тепла, израсходованного в печи (первая цифра относится к мазутным, вторая — к газовым печам).

В настоящее время у большей части мартеновских печей охлаждение испарительное, т. е. производится кипящей водой, а водоохлаждаемые элементы в этих условиях вырабатывают пар (50—400 *кн/м*^{2} и выше), пригодный для теплофикации или для использования в паровых турбинах низкого давления. Испарительное охлаждение, впервые осуществленное на мартеновских печах, не снижает, а увеличивает эксплуатационную надежность печей и дает высокий экономический эффект: к. п. д. печей повышается с 15—20 до 25—35% и, кроме того, резко сокращается расход охлаждающей воды, а также соответственно уменьшается расход энергии на ее перекачку.

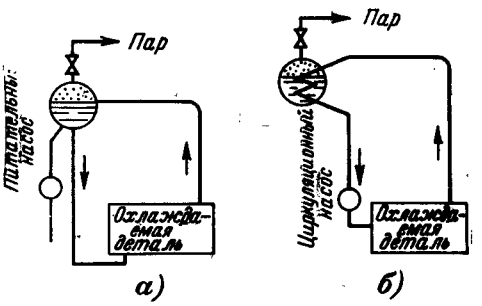


Рис. 8-5. Принципиальные схемы испарительного охлаждения металлических элементов печей.

а — испарительное водяное охлаждение; *б* — испарительное охлаждение с промежуточным теплоносителем.

На рис. 8-5 показаны принципиальные схемы испарительного охлаждения. На схеме *а* изображен принцип действия испарительного охлаждения с естественной циркуляцией воды. Каждая охлаждаемая деталь представляет собою элементарный котелок, включенный в бак-сепаратор. На схеме *б* показано испарительное охлаждение высокотемпературным органическим теплоносителем ВОТ (дифенильной смесью, имеющей температуру кипения 258 °С при 760 *мм рт. ст.*, что позволяет повышать параметры получаемого пара при обычной конструкции водоохлаждаемых деталей). Смесь прогоняется через охлаждаемые детали насосом и, нагреваясь, поступает в бойлер, в котором вырабатывается водяной пар.

При схеме *а* все охлаждаемые элементы параллельно включаются в коллекторы, в свою очередь соединяемые с барабаном-сепаратором, расположенным на большой высоте (более 10 *м*) над печью. Каждый элемент вместе с соединительными трубами составляет циркуляционный контур, в котором имеет место естественная циркуляция воды. Принудительная многократная циркуляция воды осуществляется при помощи насоса; при этом еще больше повышается надежность работы системы охлаждения. В настоящее время при многократной циркуляции получают пар с давлением до 4 *Мн/м*^{2}, но это требует специального устройства охлаждаемых деталей (повышенной их прочности). Питательная (охлаждающая) вода подается от химводоочистительных установок ТЭЦ.

8-5. ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЕ БАЛАНСЫ

Тепловые балансы агрегатов выражают первый закон термодинамики и позволяют судить о тепловой экономичности этих агрегатов, характеризуемой их к. п. д. или удельными расходами тепла. Однако в тепловых балансах не учитывается качество энергии, т. е. ее ценность с точки зрения дальнейшего использования. Так, например, 1 *Мдж* тепла в продуктах горения при 2 000 °С только количественно равен 1 *Мдж* тепла при 200 °С, качество же его намного выше. При работе мартеновской печи выплавка стали происходит за счет передачи тепла шихте, причем количество тепла в процессе не меняется, а происходит снижение качества (деградация) тепла, выражающаяся в уменьшении его температурного потенциала.

Механическая и электрическая энергии взаимно превращаются друг в друга, и поэтому качественно равноценны, но тепло, как известно из второго закона термодинамики, превращается в работу не полностью. Термодинамическое совершенство установки может характеризоваться величиной эксергии E, т. е. той максимальной работы, которая может быть получена из заданного количества тепла Q при обратимом переходе из начального состояния в состояние равновесия с окружающей средой. Из соотношения, справедливого для обратимого цикла Карно, имеем:

$$\frac{E}{Q}=1-\frac{T_0}{T} \quad \text{или} \quad E=Q\left(1-\frac{T_0}{T}\right), \tag{8-3}$$

где T — абсолютная температура теплоносителя, отдающего тепло Q; T_0 — абсолютная температура окружающей среды, в которую отводится та часть тепла, которая не может быть превращена в работу.

Коэффициент $(1—T_0/T)$, на который нужно умножить тепло Q, чтобы получить величину эксергии E, можно назвать коэффициентом качества тепла, так как он показывает, что чем выше температура теплоносителя T, тем ценнее тепло Q, так как тем больше эксергия. Точно так же потери тепла при более высокой температуре соответствуют большим потерям эксергии, чем при более низкой температуре. Если даже тепло полностью передается от тела A с температурой T_A к телу B с более низкой температурой T_B, то и тогда имеет место потеря эксергии в количестве

$$\Delta E=Q\left(\frac{T_0}{T_B}-\frac{T_0}{T_A}\right). \tag{8-4}$$

Это означает, что до передачи тепла от тела A к телу B в работу в идеальном процессе могла бы быть превращена часть тепла равная $Q\left(1-\frac{T_0}{T_A}\right)$, но после передачи тепла в работу может быть превращено меньшее количество тепла, равное $Q(1-T_0/T_B)$.

Удельная эксергия потока рабочего тела, приходящаяся на 1 *кг* этого тела, определяется на основании первого и второго законов термодинамики по формуле, пригодной для твердых, жидких и газообразных тел:

$$e=i—i_0—T_0(s—s_0); \tag{8-5}$$

здесь i_0 и s_0 — энтальпия и энтропия рабочего тела при давлении и температуре окружающей среды.

Для иллюстрации на рис. 8-6 показана величина e/i, т. е. отношение удельной эксергии к удельной энтальпии для воздуха (и приблизительно для дымовых газов).

Из графика видно, что при перепаде температуры $\Delta\vartheta=1\,000$ °С это отношение равно 0,57, а при $\Delta\vartheta=100$ °С оно равно 0,15, т. е. в работу

можно превратить соответственно от 57 до 15% располагаемой энтальпии.

Для термодинамически обратимых химических реакций соединения углерода, водорода и углеводородов с кислородом отношение e/i близко к единице, следовательно, эти топлива являются очень ценными источниками энергии. При сжигании же этих топлив их химическая энергия превращается в менее ценную тепловую энергию, поэтому при горении имеет место потеря эксергии[1].

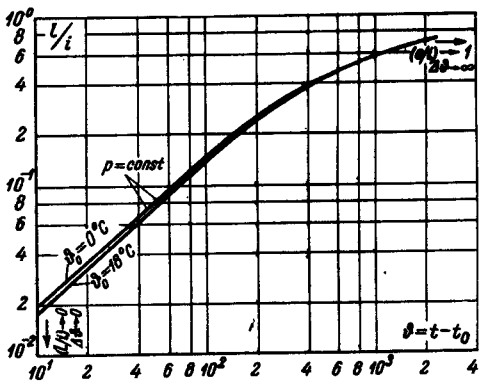


Рис. 8-6. Отношение e/i для воздуха при разных значениях $t-t_0$.

Для характеристики термодинамической эффективности работы печей составляются эксергетические балансы и определяются эксергетические к. п. д., представляющие отношение полезно усвоенной эксергии к эксергии затраченной. Потери эксергии делятся на внешние и внутренние. Внешние потери—это потери с отходящими газами, потери в окружающую среду и пр.; внутренними потерями являются невозвратимые потери, обусловленные необратимостью процессов горения, теплопередачи, смешения, присосов воздуха и др.

Из уравнения эксергического баланса

$$\Sigma E_{\text{подв}} = \Sigma E_{\text{отв}} + \Sigma E_{\text{вн.п}}$$

можно получить равенство

$$\Sigma E_{\text{вн.п}} = \Sigma E_{\text{подв}} - \Sigma E_{\text{отв}}, \qquad (8\text{-}6)$$

где $\Sigma E_{\text{подв}}$ — сумма подведенных эксергий; $\Sigma E_{\text{отв}}$ — сумма отведенных эксергий; $\Sigma E_{\text{вн.п}}$ — сумма внутренних потерь эксергии.

В отличие от теплового баланса в эксергетическом балансе сумма отведенных эксергий всегда меньше суммы подведенных эксергий на величину внутренних потерь эксергии.

Анализ изменения эксергии в процессе позволяет оценить тепловую эффективность установки, выявить узлы установки, где имеют место потери эксергии, вскрыть причины этих потерь и наметить мероприятия по их уменьшению.

Особенно большими потерями эксергии сопровождается процесс горения, который всегда связан с теплоотдачей факела (продуктов горения), являющегося также необратимым процессом. Диссоциация газов увеличивает потерю эксергии. Эксергия увеличивается при нагреве исходных компонентов горения — топлива и воздуха (подогревается, как известно, только газообразное и иногда жидкое топливо, твердое топливо не подогревается). Если подогревается только воздух и не учитывается диссоциация газов, то коэффициент уменьшения необратимости по Шаргуту будет:

$$\nu = \frac{\Delta e_{\text{п.г}}}{\Delta e_{\text{исх}}}, \qquad (8\text{-}7)$$

где $\Delta e_{\text{п.г}}$ — приращение эксергии продуктов горения, полученное в результате подогрева воздуха; $\Delta e_{\text{исх}}$ — приращение эксергии воздуха при подогреве.

[1] Для необратимых химических реакций, протекающих при постоянном давлении изменение энтальпии равно тепловому эффекту реакции, т. е. $i_2 - i_1 = Q_p$.

При изобарном процессе сжигания топлива без диссоциации коэффициент уменьшения необратимости составляет:

$$\nu = \frac{T_к - T_0}{T_к} \cdot \frac{T'}{T' - T_0} = \left(1 - \frac{T_0}{T_к}\right)\left(1 - \frac{T'}{T_0}\right), \qquad (8\text{-}8)$$

где $T_к$, T' и T_0 — соответственно абсолютные температуры: калориметрическая температура, температура подогретого воздуха и температура окружающей среды.

Чем выше температура подогрева воздуха, тем меньше потери от необратимости при горении.

Величина подогрева воздуха влияет и на потерю эксергии при необратимости теплообмена в камере сгорания и на потерю эксергии с уходящими газами. Эти потери также заметно сокращаются при подогреве воздуха.

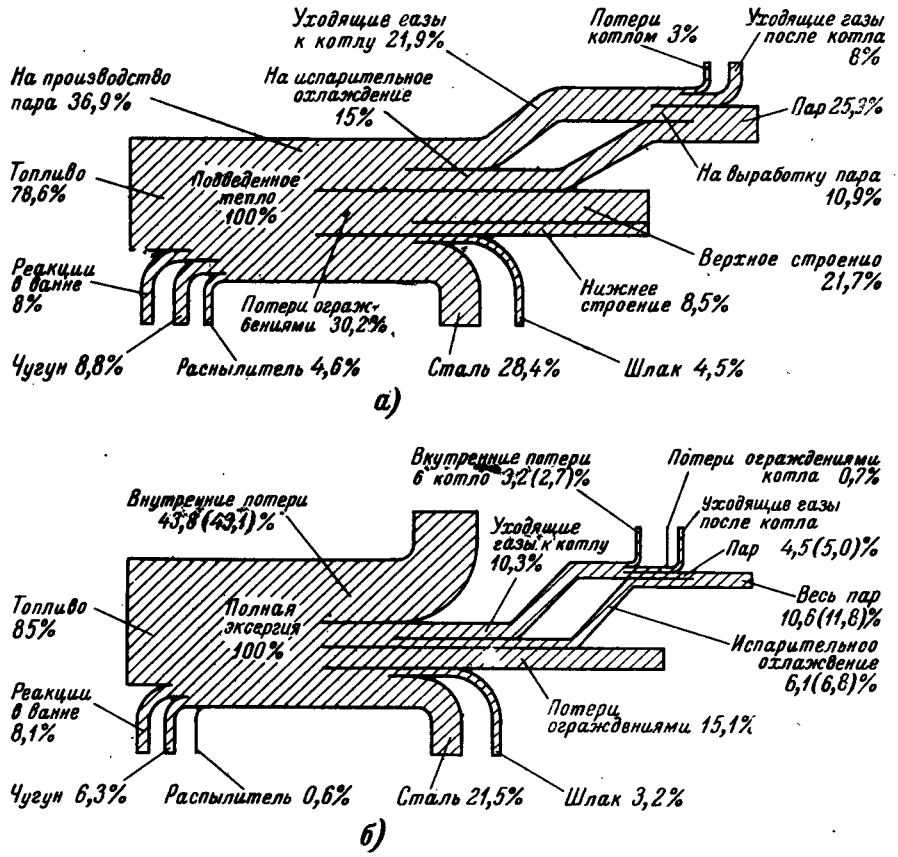


Рис. 8-7. Тепловой балаис сталеплавильной мартеновской печи (*а*) и эксергетический баланс для той же печи (*б*), составленный для паза 15 *бар* и 300 °С и для пара 35 *бар* и 350 °С (иа рисуике в скобках).

В качестве примера на рис. 8-7 приведены тепловой (*а*) и эксергетический (*б*) балансы 150-тонной мартеновской печи, работающей на мазуте при скрап-рудном процессе (с испарительным охлаждением). Тепловой к. п. д. этой печи составляет 54,3%, эксергетический к. п. д. 32,1%.

Эксергетические балансы являются дополнительной характеристикой промышленной печи; они составляются дополнительно к тепловым балансам в сложных случаях, когда определяется наивыгоднейшее размещение поверхностей нагрева для использования тепла отходящих газов: котлов-утилизаторов, регенераторов или рекуператоров, т. е. энерготехнологических установок.

РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

ГАЗОСНАБЖЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И ГАЗОВОЕ ХОЗЯЙСТВО ЗАВОДОВ

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

ГОРЮЧИЕ ГАЗЫ

9-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ

Горючими газами называются смеси горючих и негорючих газообразных веществ, используемые в технике в качестве топлива или сырья для химической промышленности. В дальнейшем они рассматриваются лишь как топливо для промышленных предприятий.

Количество горючих газов измеряется в кубических метрах при нормальных условиях (0° С и 760 *мм рт. ст.)* или иногда при стандартных условиях (20 °С и 760 *мм рт. ст.)*. Горючие газы обычно содержат некоторое количество примесей — водяных паров, смолы, пыли и пр. Содержание примесей обычно дается в граммах на 1 $м^3$ сухого газа при нормальных условиях.

Горючие газы обычно характеризуются составом их сухой части в процентах по объему. В общем случае состав сухого природного газа в процентах по объему может быть выражен равенством, в котором горючие компоненты составляют горючую часть, а негорючие — балласт:

$$CO+H_2+CH_4+C_mH_n+H_2S+CO_2+O_2+N_2=100\%. \qquad (9\text{-}1)$$

Иногда дается состав влажного горючего газа, тогда

$$CO+H_2+CH_4+C_mH_n+H_2S+CO_2+O_2+N_2+H_2O=100\%. \qquad (9\text{-}2)$$

Химические формулы, молекулярные массы, плотности и другие характеристики компонентов приведены в табл. 9-1.

Таблица 9-1

Характеристика компонентов, входящих в состав газообразного топлива

Наименование газа	Химическая формула	Молекулярная масса	Плотность, *кг/м³*	Теплота сгорания, *Мдж/м³*		Жаропроизводительность, °С
				высшая	низшая	
Водород	H_2	2,016	0,090	12,758	10,790	2 230
Окись углерода	CO	28,01	1,250	12,628	12,628	2 370
Метан	CH_4	16,042	0,717	39,792	35,832	2 030
Этилеи	C_2H_4	28,052	1,260	63,047	59,058	2 290
Этан	C_2H_6	30,068	1,356	69,717	63,789	2 090
Пропилен	C_3H_6	42,078	1,915	91,996	85,967	2 220
Пропан	C_3H_8	44,094	2,004	99,219	91,321	2 105
Бутилен	C_4H_8	56,104	—	121,485	113,595	2 195
Бутаи	C_4H_{10}	58,120	2,703	128,607	118,680	2 170
Ацетилеи	C_2H_2	26,036	1,171	58,052	56,083	2 620
Сероводород	H_2S	34,082	1,539	25,425	23,401	1 850
Азот	N_2	28,016	1,250	—	—	—
Двуокись углерода	CO_2	44,010	1,977	—	—	—
Кислород	O_2	32,000	1,429	—	—	—

Теплота сгорания 1 $м^3$ сухого газа определяется по формуле смешения

$$Q^c = 0{,}01\,[Q_{CO}CO + Q_{H_2}H_2 + Q_{CH_4}CH_4 + Q_{H_2S}H_2S + \Sigma(Q_{C_mH_n}C_mH_n)], \quad (9\text{-}3)$$

где Q_{CO}, Q_{H_2} и т. д. — теплоты сгорания горючих компонентов, приведенные в табл. 9-1.

Подставляя в эту формулу значения низших теплот сгорания компонентов, получаем формулу для определения низшей теплоты сгорания 1 $м^3$ сухого газа:

$$Q_н^c = 0{,}12628CO + 0{,}1079H_2 + 0{,}35832CH_4 + 0{,}23401H_2S + 0{,}59058C_2H_4 + \\ + 0{,}63789C_2H_6 + 0{,}91321C_3H_8 + 0{,}85967C_3H_6, \ Мдж/м^3. \quad (9\text{-}4)$$

Углеводородные газы, содержащиеся в горючих газах, по своим химическим свойствам делятся на предельные, или насыщенные (алканы), и непредельные, или ненасыщенные (алкены).

К *предельным углеводородам,* имеющим общую формулу C_nH_{2n+2}, относятся газы: метан CH_4, этан C_2H_6, пропан C_3H_8 и бутан C_4H_{10}.

Первые два газа сжижаются при низких температурах и высоких давлениях, а пропан и бутан легко сжижаются при небольших давлениях (0,6—1,2 $Мн/м^2$) при комнатной температуре; это свойство пропана и бутана используется для транспортировки их в жидком виде в цистернах или баллонах. Предельные углеводороды отличаются химической инертностью, устойчивостью, неизменяемостью при хранении, почему они иначе называются *парафинами* («парум афинис» означает «не имеющий сродства»).

Непредельные углеводороды, имеющие общую формулу C_nH_{2n}, характеризуются большой химической активностью. К непредельным углеводородам, содержащимся в технических горючих газах, относятся главным образом этилен C_2H_4, пропилен C_3H_6 и бутилен C_4H_8. Эти углеводороды иначе называются олефинами и имеют одну двойную связь между соседними углеродными атомами. Часто встречающийся в технике ацетилен C_2H_2 относится к группе ненасыщенных углеводородов с одной тройной связью (алкинам), а бензол C_6H_6 — к ароматическим углеводородам.

Горючие газы делятся на природные и искусственные.

Природные газы представляют собой смесь различных углеводородов с преимущественным содержанием метана, включающую небольшие количества CO_2, N_2 и других газов. Природные газы чисто газовых месторождений содержат большое количество метана CH_4 (до 93—98%). Газы газонефтяных месторождений содержат меньше метана, но соответственно большее количество его гомологов (этана, пропана, бутана). Эти газы добывают попутно с нефтью.

Природный газ, выходящий из скважины, иногда содержит пары бензина; кроме того, газ выносит с собой песок и воду. Поэтому на месте добычи из газа улавливается бензин, газ подвергается очистке и осушению, а затем транспортируется к потребителям по газопроводам. Незначительное содержание балласта позволяет транспортировать природный газ на большие расстояния.

Природный газ используется как топливо для промышленности и бытовых нужд и является сырьем для получения многих химических продуктов (водорода, ацетилена, бензола, метилового спирта, ацетона, каучука, толуола, антрацена, сажи и др.). Особенно большое значение представляют попутные нефтяные газы, из которых можно получить ценные синтетические продукты.

Эти продукты могут быть получены путем окисления газа, крекинга, а также путем хлорирования. Более подробно о природном газе см. в гл. 10.

Искусственные газы делятся на газы, получаемые при термической переработке топлива, которая заключается в разложении топлива при нагревании его без доступа кислорода, когда помимо газа получают еще твердый остаток — кокс или полукокс, и на газы, получаемые при газификации твердого топлива, заключающейся во взаимодействии его с воздухом, водяным паром или двуокисью углерода, когда практически все топливо, за исключением негорючей золы, превращается в газ.

Из категории искусственных газов очень большое значение в промышленности имеет *коксовый (коксовальный) газ,* получаемый при коксовании углей.

Состав коксового газа на практике значительно колеблется в зависимости от исходного топлива, различия в режимах работы и состояния коксовых печей. Теплота сгорания его изменяется от 15,1 до 18,9 *Мдж/м*^{3}. Средние характеристики коксового газа, как и ряда других газов, приведены в табл. 9-2.

Таблица 2-9

Средний состав, теплота сгорания и плотность основных горючих газов

Вид газа	Состав газа, % по объему								$Q_н^c$, *Мдж/м*^{3}	Плотность, ρ, *кг/м*^{3}
	CO_2	H_2S	C_mH_n	O_2	CO	H_2	CH_4	N_2		
Доменный газ	13,7	—	—	—	26,5	1,8	0,1	57,7	3,645	1,29
Коксовый газ из каменных углей	3,0	0,2	2,0	1,0	6,0	56,0	22,0	9,8	15,838	0,50
Генераторный смешанный газ из каменного угля	7,0	1,0	0,3	0,2	25,0	15,0	2,5	49,0	6,034	1,13
Генераторный газ при газификации под высоким давлением (очищенный)	3,0	—	0,7	0,3	18,0	56,0	18,0	4,0	15,126	0,52
Сжиженный газ	—	—	C_3H_8=50 C_4H_{10}=50	—	—	—	—	—	104,25	2,27
Природный газ ставропольский	0,1	—	C_2H_6=0,4 C_3H_8=0,1 C_4H_{10}=0,1	—	—	—	98,0	1,3	35,564	0,73

Московский городской газ представляет собой смесь природных газов различных месторождений и коксового.

Нефтяной крекинг-газ получается при всех способах крекинга нефтепродуктов. Его теплота сгорания составляет 40—60 *Мдж/м*^{3}, и он является наиболее высококалорийным газом.

Крекинг является основой переработки нефтяного сырья в жидкие моторные топлива с получением одновременно нефтяного крекинг-газа. Сущность процесса крекинга состоит в термохимическом разложении высокомолекулярных углеводородов нефтяного сырья. Процесс ведется в трубчатых печах под давлением при температуре 450—650 °С, иногда в зависимости от способа в присутствии катализаторов или без них. При другом виде термохимической переработки нефтепродуктов — пиролизе, осуществляемом при температурах 650—750 °С при атмосферном давлении, получают помимо жидких углеводородов и пиролизный нефтяной газ.

Генераторный газ получают при газификации различных твердых топлив в газогенераторах при помощи воздуха, водяного пара и иногда двуокиси углерода. Теплота сгорания генераторного газа колеблется обычно в пределах 5,03—6,71 *Мдж/м*³, достигая (для водяного генераторного газа) 10,5 *Мдж/м*³. В промышленности применяется способ получения генераторного газа с теплотой сгорания до 16,8 *Мдж/м*³ с использованием парокислородного дутья при газификации под высоким давлением. Этот метод позволяет осуществлять переработку низкосортных бурых углей на месте их добычи с передачей высококалорийного газа потребителям по газопроводам на значительное расстояние.

Доменный газ получается в больших количествах при выплавке чугуна в доменных печах. Он является низкокалорийным газом — его теплота сгорания составляет лишь 3,35—4,19 *Мдж/м*³, и поэтому в высокотемпературных печах его чаще всего сжигают в смеси с коксовым газом. Доменная печь представляет собой как бы мощный газогенератор с выпуском жидких шлаков, работающий на коксе. Одновременно с газогенераторным процессом в печи осуществляется металлургический

Таблица 9-3

Классификация горючих газов

Источник получения газа	Метод получения	Группа газа	Название газа	Низшая теплота сгорания сухого газа, *Мдж/м*³	Жаропроизводительность $t_ж$, °С
		I. Природные газы			
Подземные газовые месторождения	Выделяются из газоносных пластов земли через специальные скважины	Природные газы сухие	Природный газ чисто газовых месторождений	29,4—37,8	1 990
Подземные нефтяные месторождения	Получают при добыче нефти	Жирные природные газы (нефтяные газы)	Природный газ нефтяных месторождений (попутный газ)	33,6—62,8	2 090
		II. Искусственные газы			
Нефтяной попутный газ	Сжижение бутана, пропана, этана и пр.	Жидкие углеводородные газы	Сжиженный газ	83,8—105	2 080
Твердые топлива	Сухая перегонка топлива	—	Коксовый газ из каменного угля, торфа, и других твердых топлив	14,7—18,9	2 060—2 100
			Полукоксовый газ из бурых углей	8,4—12,6	1 600—1 800
Твердые и жидкие топлива	Газификация топлива	Низкокалорийные газы	Доменный газ	3,35—4,19	1 440
			Генераторный смешанный газ из различных твердых топлив и мазута	4,6—6,7	1 640—1 720
		Высококалорийные газы	Газ при газификации углей под высоким давлением	11,5—16,8	2 100
Жидкие топлива	Термическая переработка нефтепродуктов	Нефтяной газ	Нефтяной крекинг-газ	41,9—62,8 и более	2 090—2 110
			Пиролизный нефтяной газ		
Негорючие материалы	Разложение карбида кальция водой	Карбидный газ	Ацетилен	56,1	2 620

процесс выплавки чугуна из железной руды. Оба процесса органически связаны, причем выработка доменного газа имеет подчиненное значение.

Классификация газообразного топлива приведена в табл. 9-3.

Помимо деления газов на природные и искусственные каждая из этих двух категорий имеет и свои внутренние классификационные признаки — источник получения, метод получения, состав газа, теплота сгорания и жаропроизводительность.

Основными энергетическими характеристиками горючих газов, как и других видов топлива, являются теплота сгорания, жаропроизводительность, а также радиационная (излучательная) способность факела. Последние две характеристики имеют основное значение при использовании газа в высокотемпературных огнетехнических агрегатах. В самом деле, например, жаропроизводительность доменного газа составляет около 1 440 °С. Следовательно, как бы много ни сжигать этого газа, всегда температура горения будет менее 1 440 °С, так как в установке имеют место потери тепла; достигнутая же температура может оказаться недостаточной для многих высокотемпературных технологических процессов.

Горючие газы делят на газы с высокой жаропроизводительностью — от 1 990 до 2 330 °С, со средней жаропроизводительностью — от 1 440 до 1 990 °С и с низкой жаропроизводительностью — от 930 до 1 440 °С.

Для повышения температуры продуктов горения применяют регенерацию тепла, т. е. осуществляют подогрев газа и воздуха в теплообменниках за счет тепла отходящих газов.

Радиационная способность факела играет большую роль в работе огневых технологических агрегатов, так как часто бо́льшая часть тепла передается нагреваемому материалу лучеиспусканием от газов (факела).

Некоторые газы обладают отравляющим действием на организм человека и животных.

Сероводород является ядовитой составляющей горючих газов, сильно действующей на нервную систему людей и раздражающей дыхательные пути и слизистые оболочки. Отравление наступает уже при содержании H_2S в воздухе 0,025% (0,4 *мг/л*), при больших концентрациях возможен смертельный исход от отравления. Предельно допустимое содержание H_2S в воздухе равно 0,002 *мг/л*; при такой концентрации начинает ощущаться его запах. Окись углерода весьма опасна, так как отравление происходит уже при концентрации 0,02 *мг/л* (0,02 *г/м*^{3}); при 0,05 *мг/л* вдыхание в течение нескольких часов приводит к смерти; предельно допустимая концентрация равна 0,002 *мг/л*. При больших концентрациях смерть наступает почти мгновенно. Окись углерода слабо поглощается активированным углем противогаза. Метан сам по себе не ядовит, но если в воздухе содержится много метана (25—30%), то наступает удушье из-за недостатка кислорода. Тяжелые углеводороды действуют отравляюще и тем сильнее, чем выше их молекулярная масса; содержание их в воздухе в количестве 10% по объему вызывает головокружение. Двуокись углерода CO_2 в малых концентрациях в воздухе активизирует работу дыхательных центров; содержание ее в количестве более 3% по объему вызывает учащенное дыхание, а при 10% могут иметь место потеря сознания и смерть. Азот действует удушающе при содержаниях в воздухе 83% и более (вместо обычного содержания 79%).

Пользование газом и эксплуатация газового хозяйства требуют строгого соблюдения правил техники безопасности. При отравлении пострадавшего необходимо вынести из загазованной зоны на свежий воздух, расстегнуть стесняющую одежду, обеспечить дыхание, если рот судорожно сжат, давать нюхать нашатырный спирт; если пострадавший

находится в бессознательном состоянии и пульс отсутствует, то следует немедленно приступить к искусственному дыханию и продолжать его до прихода врача. На предприятиях должна быть организована газоспасательная служба с хорошо обученным персоналом и необходимым оборудованием.

Горючие газы бесцветны и не имеют характерного запаха, если в их состав не входит сероводород; последний имеет резкий запах тухлых яиц. Для облегчения отыскания мест утечки и для обнаружения утечки газ одоризируется, т. е. ему придается пахучесть путем вспрыскивания одорантов — серосодержащих жидкостей (16—18 *г* на 1 000 $м^3$ газа).

9-2. ДОБЫЧА ПРИРОДНОГО ГАЗА И ДАЛЬНЕЕ ГАЗОСНАБЖЕНИЕ

Горючие природные газы на протяжении геологических эпох образовывались при разложении веществ растительного и животного происхождения[1] и скапливались в подземных куполах, образуемых изогнутыми пластами пород (в трещинах и пóровом пространстве пород). Эти газы представляют смесь различных углеводородов с преимущественным содержанием метана и небольшим балластом, главным образом в виде двуокиси углерода CO_2 и азота N_2, и находятся в виде свободных газо-

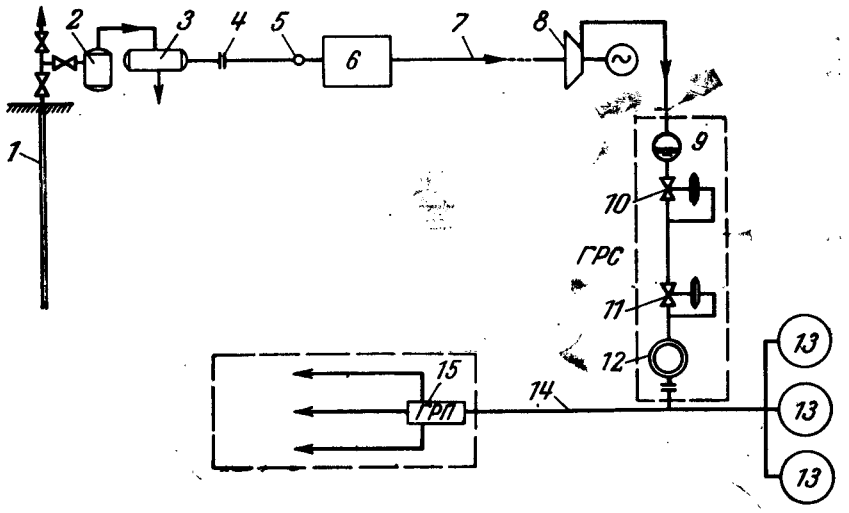


Рис. 9-1. Принципиальная схема добычи, транспортирования и распределения природного газа.

1 — скважина; *2* — первичный пылеотделитель механических примесей; *3* — сепаратор для улавливания взвешенной влаги; *4* — прибор для измерения количества газа; *5* — коллектор для сбора газа из разных скважин; *6* — устройства для очистки и осушки газа; *7* — магистральный газопровод; *8* — компрессорная станция; *9* — газораспределительная станция (ГРС); *10* и *11* — регуляторы 1-й и 2-й ступени; *12* — одоризатор; *13* — газгольдеры; *14* — газораспределительный трубопровод подачи газа на предприятие; *15* — заводской газорегулировочный пункт (ГРП).

вых скоплений (чисто газовые месторождения) или растворенными в нефти; в последнем случае они добываются вместе с нефтью (попутные нефтяные газы). Горючие газы заключаются также в угольных пластах и могут быть использованы путем дегазации угольных пластов, что увеличивает безопасность последующей разработки угольных пластов.

[1] Процесс образования природного газа наблюдается и в настоящее время (болотный газ).

Газ добывается через скважины (рис. 9-1), глубина которых определяется глубиной залегания газовых пластов и достигает 5 000 *м* и более. Давление в газовых пластах очень большое — от 7 до 40 *Мн/м²*, поэтому газ из скважин выходит под действием пластового давления. По выходе из скважин газ направляется на очистку от песка, пыли и других веществ в центробежных сепараторах. Газ подвергается, кроме того, осушке, так как при транспортировке влажных газов образуются кристаллогидраты тяжелых углеводородов, которые забивают трубопроводы, уменьшая их сечение.

В попутных нефтяных газах содержится значительное количество газового бензина, и поэтому производится его улавливание. Иногда газ очищается от сероводорода и двуокиси углерода, что повышает его качество и улучшает условия транспортирования. Очищенный природный газ направляется по газопроводу из стальных труб от места добычи к потребителям. Незначительное содержание балласта позволяет транспортировать газ на большие расстояния. На трассе газопровода сооружаются перекачивающие компрессорные станции (примерно одна станция на 120—160 *км*), повышающие давление газа; повышение давления газа необходимо, так как расходуется оно на преодоление сопротивлений при движении на данном участке. Давление газа в начале участка 6 *Мн/м²* и в конце его 2,5 *Мн/м²*. Современные компрессорные станции оборудуются центробежными компрессорами с приводом от газовых турбин мощностью до 4 000—9 000 *квт* или от электродвигателей. Длина газопровода Ставрополь — Москва 1 300 *км*, его диаметр 720 *мм*. В 1963 г. введена в эксплуатацию первая очередь мощного газопровода Бухара — Урал длиной примерно 2 000 *км*, диаметром 1 020 *мм*; его вторая очередь закончена в 1965 г. Построен и пущен в эксплуатацию газопровод Игрим — Серов и др.

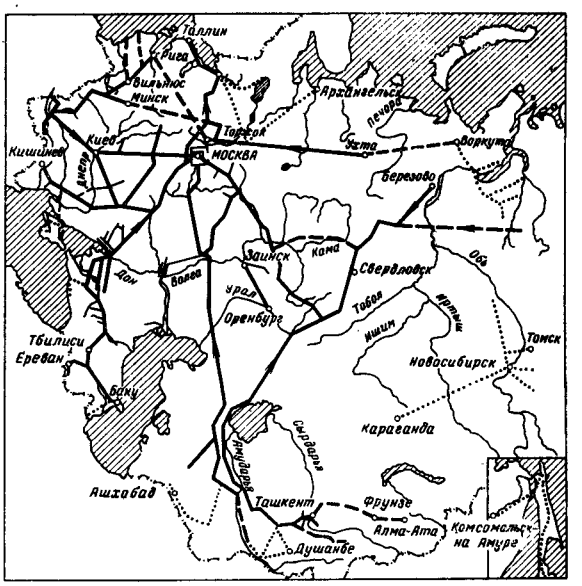


Рис. 9-2. Схема главнейших газопроводов СССР.
——— действующие; — — — — строящиеся; · · · · · — проектируемые.

В текущей пятилетке намечен большой прирост добычи природного газа. В 1975 г. планируется добыть 300—320 млрд. *м³*. Это будет достигнуто главным образом за счет освоения новых уникальных месторождений в Оренбургской области, Коми АССР, Тюменской области, а также Узбекской и Туркменской союзных республиках. Эти месторождения станут крупнейшими базами газоснабжения страны. За пятилетку будет построено не менее 30 тыс. *км* магистральных газопроводов.

В результате общая длина газовых магистралей превысит 100 тыс. *км*. При этом газопроводы основных магистралей будут сооружаться из тонкостенных труб диаметром 1 420 *мм*. Тем самым будет сделан крупный шаг к созданию единой системы газоснабжения страны. На рис. 9-2 сплошными линиями схематически показаны действующие магистральные газопроводы, а пунктирными — строящиеся.

9-3. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИРОДНОГО ГАЗА

Средний состав природных газов некоторых крупных месторождений СССР приведен в табл. 9-4.

Состав природного газа одного месторождения для разных скважин может быть различным; для одной и той же скважины он несколько

Таблица 9-4

Средний состав, плотность и теплота сгорания природных газов некоторых месторождений СССР

Месторождение газов	Административный район	Состав газа, % по объему								Относительная плотность по воздуху $\rho_{отн}$	Теплота сгорания *Мдж/м³*	
		Метан CH_4	Этан C_2H_6	Пропан C_3H_8	Бутан C_4H_{10}	Пентан C_5H_{12}	Двуокись углерода CO_2	Сероводород H_2S	Азот N_2		высшая $Q_в^с$	низшая $Q_н^с$
I. Чисто газовые месторождения (газовые залежи)												
Степновское	Саратовская обл.	95,1	2,3	0,7	0,4	0,8	0,2	Нет	0,5	0,597	42,2	38,0
Елшанское	» »	93,4	2,1	0,8	0,4	0,3	0,3	Следы	2,7	0,598	40,7	36,5
Ленинградское	Краснодарский край	86,9	6,0	1,6	1,0	0,5	1,2	Нет	2,8	0,644	42,7	38,6
Газлинское	Бухарская обл.	93,0	3,1	0,7	0,6	Нет	0,1	»	2,5	0,596	40,8	36,9
Березовское	Тюменская обл.	95,1	1,1	0,3	0,1		0,4	»	3,0	0,580	39,2	35,4
Шебелинское	Харьковская обл.	93,3	4,0	0,6	0,4	0,3	0,1	»	1,3	0,597	41,7	37,6
Карадагское	Азербайджанская ССР	93,2	2,1	1,2	1,0	1,2	0,8	»	0,5	0,624	43,2	39,0
Северо-Ставропольское	Ставропольский край	98,7	0,33	0,12	0,04	0,01	0,1	»	0,7	0,562	39,9	35,9
Дашавское	Дрогобычская обл.	98,3	0,33	0,12	0,15	Нет	0,1	»	1,0	0,564	39,8	35,9
Вой-Вожское	Коми АССР	85,9	2,5	1,0	0,5	0,03	0,07	»	10,0	0,626	37,7	34,1
II. Попутные нефтяные газы												
Жирновское	Волгоградская обл.	81,6	6,5	3,0	1,9	1,4	0,4	0,1	1,5	0,712	45,3	40,7
Ромашкинское	Татарская АССР	40,0	19,5	18,0	7,5	4,9	0,1	Нет	10,0	1,069	66,8	60,0
Туймазинское	Башкирская АССР	39,5	20,0	18,5	7,7	4,2	0,1	»	10,0	1,065	65,4	59,8
Ишимбаевское	То же	48,5	18,6	17,4	6,5	2,8	0,3	5,5 *г/м³*	0,4	1,000	—	58,3

меняется по мере углубления отбора. Газ собирается из ряда скважин, дебит которых меняется с течением времени, а потому меняется и состав поступающего к потребителям газа.

Помимо состава и объемных процентов в таблице даны высшая и низшая теплота сгорания и относительная плотность по воздуху $\rho_{отн} = \rho/\rho_в$, где ρ — плотность газа, а $\rho_в$ — плотность воздуха, взятые при одних и тех же условиях (температуре и давлении). При нормальных условиях (0°С и 760 *мм рт. ст.*) $\rho_в = 1{,}293$ *кг/м³*, поэтому плотность газа при нормальных условиях может быть определена по формуле

$$\rho_0 = 1{,}293\rho_{отн},\ кг/м^3. \tag{9-5}$$

Плотность газа связана с его удельным объемом и молекулярной массой соотношениями

$$\rho_0 = \frac{1}{v} = \frac{\mu}{22{,}4},\ кг/м^3; \tag{9-6}$$

здесь v — удельный объем, *м³/кг*; μ — молекулярная масса газа.

Газовая постоянная находится по формуле

$$R = \frac{8314{,}4}{\mu},\ дж/(кг \cdot град). \tag{9-7}$$

Для природных сухих газов $R = 460 \div 510$ *дж/(кг · град)*. Уравнение состояния природного газа имеет вид:

$$pv = zRT, \tag{9-8}$$

где p — абсолютное давление газа, $н/м^2$; T — абсолютная его температура, °К; z — поправка на сжимаемость, составляющая при температуре от 0 до 50° при разных давлениях:

$Мн/м^2$	z
0,1	1,0—1,18
2,0	0,85—1,16
5,0	0,88—1,11

Для идеального газа $z=1$.

9-4. СЖИЖЕННЫЙ ГАЗ

Сжиженный газ используется в тех случаях, когда подача газа к потребителям при помощи газопроводов экономически не оправдана. У потребителей сжиженный газ вновь переводится в газовую фазу, причем объем его увеличивается, как видно из табл. 9-5, примерно в 300 раз. Следовательно, сжиженный газ отличается очень высокой теплоплотностью. Сжижению подвергаются в основном тяжелые углеводороды — пропан C_3H_8 и бутан C_4H_{10} при сравнительно небольшом повышении давления без снижения температуры. Эти газы в значительном количестве содержатся в попутных нефтяных газах, которые и являются сырьем для получения сжиженных газов. Соотношение между пропаном и бутаном в сжиженном газе может быть различным: в техническом пропане согласно ГОСТ должно содержаться C_3H_8 не менее 93% и этана не более 4%, а в техническом бутане не менее 93% C_4H_{10}. В пропан-бутановой смеси этана также не должно быть более 4%, так как наличие этана вызывает увеличение давления. Сжиженные газы получаются также на нефтеперерабатывающих заводах, но тогда они содержат, кроме предельных, также и непредельные углеводороды — пропилен

Таблица 9-5

Характеристика основных составляющих сжиженных газов

Показатель	Пропан C_3H_8	Изобутан C_4H_{10}	н-бутан C_4H_{10}	Этан C_2H_6	Пропилен C_3H_6	Бутилен C_4H_8	Этилен C_2H_4
Молекулярная масса	44,09	58,12	58,12	30,06	42,08	56,10	28,05
Температура кипения при нормальном давлении, °С	—42,1	—10,2	—0,5	—89	—47,7	+6,6	—103,7
Критическая температура $t_{кр}$, °С	95,7	134,0	152,8	32,3	91,6	147	9,8
Критическое абсолютное давление $p_{кр}$, $Мн/м^2$	4,3	3,6	3,5	4,8	4,7	4,0	5,2
Низшая теплота сгорания, $Мдж/м^3$	91,321	118,68	124,853	63,789	85,967	113,595	59,058
Плотность жидкости при 760 *мм рт. ст.* и температуре кипеиня, $кг/л$	0,585	0,569	0,589	0,546	0,609	0,646	0,566
Плотиость газа при 760 *мм рт. ст.* и 0 °С, $кг/м^3$	2,019	2,668	2,703	1,356	1,915	2,500	1,206

C_3H_6 и бутилен C_4H_8. Наличие этилена вызывает увеличение давления. В табл. 9-5 приведена характеристика компонентов сжиженных газов.

Производство сжиженных газов за последние годы резко возросло. Сжиженные газы перевозят по железным дорогам (в специальных цистернах емкостью 35—60 $м^3$) или в автомобильных цистернах. Большие количества могут транспортироваться по трубопроводам малого диаметра. Бутан перевозится под давлением 0,8 $Мн/м^2$, пропан — 2 $Мн/м^2$. Хранение производят в стальных горизонтальных, цилиндрических и шаровых газгольдерах емкостью от 25 до 1 000 $м^3$.

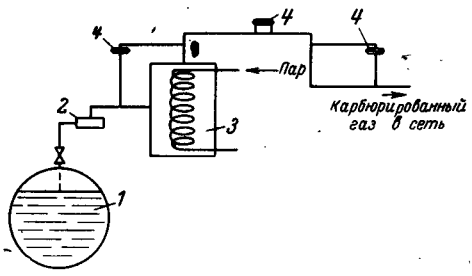


Рис. 9-3. Схема установки для снабжения сжиженным газом.

На рис. 9-3 показана схема установки для питания потребителей с использованием сжиженного газа. Сжиженный газ, хранящийся в емкости *1*, подается насосом *2* в испаритель *3* и далее направляется к потребителям.

9-5. ПОДЗЕМНОЕ ХРАНЕНИЕ ГАЗА

Газ потребляется неравномерно. Пики бытового потребления газа наблюдаются в утренние часы, ночью бытовое потребление газа отсутствует вообще. Расход газа на отопление и вентиляцию достигает максимума во время зимних холодов. Промышленное потребление также идет неравномерно из-за сменности работы, неравномерности режима технологических процессов и т. д. Ясно, что при постоянной подаче газа и неравномерном расходе требуется хранение газа в больших емкостях с тем, чтобы во время пик покрывать нехватки за счет «законсервированного» газа. Хранение газа осуществляется в стальных газгольдерах, цилиндрической и, реже, шаровой формы. Стальные цилиндрические газгольдеры строятся на низкое давление газа емкостью от 10 000 до 100 000 $м^3$. Чем выше давление, тем меньше объем газгольдера, но зато тем толще должны быть его стенки. Создать очень большие емкости из стальных газгольдеров очень трудно и дорого, так как это потребовало бы больших расходов металла и капитальных затрат на сооружение. В последнее время выравнивание месячных и сезонных колебаний в потреблении газа осуществляется путем подземного хранения газа, но не в специальных искусственных резервуарах, а в порах песчаных пластов, хорошо защищенных природой сверху непроницаемой глинистой покрышкой. Могут быть использованы и подземные нефтяные выработки плотных, практически непроницаемых пород. В СССР действуют подземные «кладовые» газа: под Москвой, возле Ленинграда, близ Ташкента, под Киевом и др.

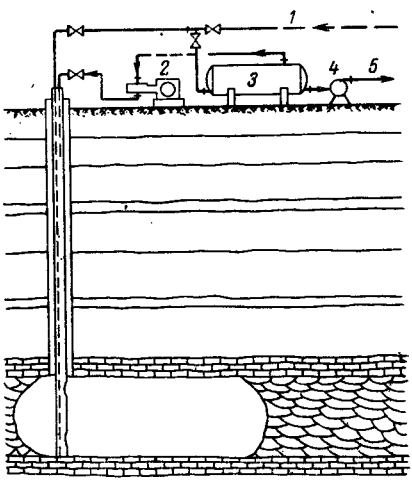


Рис. 9-4. Схема подземного хранения газа.

1 — газ на хранение; *2* — компрессор; *3* — уравнительный реаервуар; *4* — насос; *5* — газ из хранилища.

В новой пятилетке емкость подземных хранилищ вблизи промышленных центров будет значительно увеличена. Схема устройства под-

земного хранилища газа показана на рис. 9-4. При наличии избытка часть газа из магистрального газопровода мощными компрессорами под давлением 12,0 *Мн/м*^{2} через скважины нагнетается в пласт, вытесняя из пор воду. При обратной подаче газа в периоды больших расходов он подвергается очистке от механических примесей и осушке.

Сжиженные углеводородные газы также хранятся под землей. В СССР имеются большие возможности для строительства подземных емкостей в отложениях каменной соли путем размыва емкостей через скважины. Иногда подземные хранилища сжиженного газа делаются в глинистых сланцах, меловых и известковых залежах.

9-6. ПРИРОДНЫЙ ГАЗ КАК ХИМИЧЕСКОЕ СЫРЬЕ

Природные газы, как сухие, так и нефтяные попутные, являются ценным сырьем для многих химических производств. Из природного газа получают ацетилен путем окислительного крекинга; одновременно получают ряд продуктов органического синтеза (ацетальдегид, уксусную кислоту, нитрил-акриловую кислоту) и многие полупродукты для производства высокополимерных материалов.

На азотно-туковых заводах из природного газа получают дешевые азотные удобрения. Из природного газа получают формалин (путем прямого окисления газа кислородом воздуха), используемый при производстве пластмасс и искусственного волокна, а также в других отраслях промышленности.

Из природного газа производят: термическую сажу, водород, синтез-газ — сырье для производства ряда продуктов, этилен — сырье для получения полиэтилена, бензол — сырье для получения пластмасс, метилового и этилового спирта, ацетона, толуола, антрацена и др. Синтетический этиловый спирт, расходуемый в большом количестве при производстве каучука, заменяет пищевой спирт. В СССР открыты газовые месторождения с большим содержанием так называемого конденсата, т. е. жидких углеводородов, которые выпадают при снижении давления, имеющем место при выходе газа на поверхность земли (до 50 *Мн/м*^{2}). Содержание конденсата в газе составляет от 10 до 200 *г/м*^{3}. Конденсаты путем разгонки превращаются в два товарных продукта — автомобильный бензин и дизельное топливо.

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

СНАБЖЕНИЕ ПРИРОДНЫМ ГАЗОМ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

10-1. СХЕМЫ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ

Природный газ из магистральных газопроводов поступает на газораспределительные станции (ГРС), где он подвергается очистке от механических примесей; здесь же давление газа снижается до величины, допустимой для распределительных газопроводов, используемых для транспортирования его в различные части города и к промышленным предприятиям. Кроме того, на ГРС производится одорирование газа, а также осуществляется контроль его расхода. На ГРС газ дросселируется от давления в конце магистрального газопровода (1,5—4,0 *Мн/м*^{2}) до давления в начале распределительных газопроводов (0,6—1,2 *Мн/м*^{2}). Принципиальная схема ГРС с двухступенчатым дросселированием была показана на рис. 9-1.

Из термодинамики известно, что редуцирование газа вызывает потерю его работоспособности. Поэтому принципиально целесообразно

перепад давления срабатывать в газовой турбине-расширителе, приводящей в движение электрический генератор; газ перед турбиной следует подогреть в теплообменнике. Расчеты показывают, что можно получить 60—100 *квт·ч* электроэнергии на 1 000 $м^3$ газа. Можно осуществить холодильный цикл, поставив за турбиной теплообменник для охлаждения хладоагента; в этом случае можно дать внешнему потребителю 25—35 *Мдж* холода на 1 000 $м^3$ газа. Практически, однако, установку таких турбин можно осуществить лишь в случае расположения ГРС вблизи промышленного предприятия, что редко имеет место. Кроме того, установка турбин-расширителей усложняет эксплуатацию ГРС и поэтому не всегда оправдывается.

В крупных городах, получающих газ высокого давления, осуществляется трехступенчатая система газоснабжения по трем видам газопроводов: высокого давления (свыше 0,3—0,6 $Мн/м^2$ и в отдельных случаях до 1,2 $Мн/м^2$), среднего давления (от 5 $кн/м^2$ до 0,3 $Мн/м^2$) и низкого давления (до 5 $кн/м^2$).

Иногда применяется газоснабжение с двумя ступенями давления, а в отдельных случаях с одной ступенью низкого давления (при получении газа от местного коксогазового завода, а также от газогенераторной станции).

К крупным промышленным предприятиям с большим расходом газа (200—500 тыс. $м^3/ч$) газ подается распределительными газопроводами высокого давления (например, крупные ТЭЦ). Иногда предприятия нуждаются в газе высокого давления, и в этом случае независимо от масштаба расхода они подключаются к распределительным газопроводам высокого давления.

К подавляющему большинству предприятий с относительно небольшим потреблением (до 200 тыс. $м^3/ч$) газ подводится распределительными газопроводами среднего давления с установкой местных газорегулировочных пунктов (ГРП). Назначение ГРП заключается в том, чтобы снизить давление газа, поступающего на завод, до необходимой величины и автоматически поддерживать давление газа после ГРП независимо от колебаний его расхода. Кроме того, на ГРП устанавливаются приборы для замера расхода газа.

Крупные заводы с большим расходом газа, например металлургические, имеют разветвленную газовую сеть. Газ вводится распределительным газопроводом к центральному ГРП, а от него межцеховыми газопроводами подводится к цеховым регулировочным пунктам. Внутрицеховые и цеховые газопроводы распределяют газ по отдельным агрегатам, на которых разводка газа по отдельным горелкам осуществляется обвязочными газопроводами.

Схемы межцеховых газопроводов, количество и местоположение ГРП могут быть различными и зависят от давления газа перед горелками, установленными на агрегатах цехов, от расположения цехов на территории завода и от масштаба расхода газа цехами. При расположении цехов на большом расстоянии друг от друга ГРП располагаются в цехах по возможности вблизи от агрегатов с большим потреблением газа. Это позволяет стабилизировать давление газа перед горелками. При компактном расположении цехов устраивается один центральный ГРП или несколько цеховых ГРП в одном помещении.

Допустим, для примера, что завод имеет три цеха, котельную и столовую, причем в цехе № 1 требуется газ высокого давления, в котельной — среднего давления, в цехах № 2 и 3, а также в столовой — низкого давления. Схема межцеховых газопроводов для этого случая показана на рис. 10-1. В помещении центрального ГРП устанавливается ГРП высокого конечного давления — для снабжения газом цеха № 1 и ГРП среднего конечного давления — для подачи газа в остальные цехи.

Для цехов № 2 и 3 устанавливаются цеховые ГРП низкого конечного давления, для котельной — ГРП среднего конечного давления.

Имеется положительный опыт строительства открытых ГРП, располагаемых вне помещений (ЗИЛ и другие предприятия). Такие ГРП снабжаются сетчатыми ограждениями, приборы же устанавливаются в закрытых шкафах.

На схеме рис. 10-1 размещены сборники для отвода конденсата, образующегося в трубопроводах, которые укладываются с уклоном не менее 0,003 (3 *мм* на 1 *м*). Межцеховые газопроводы изготовляются из

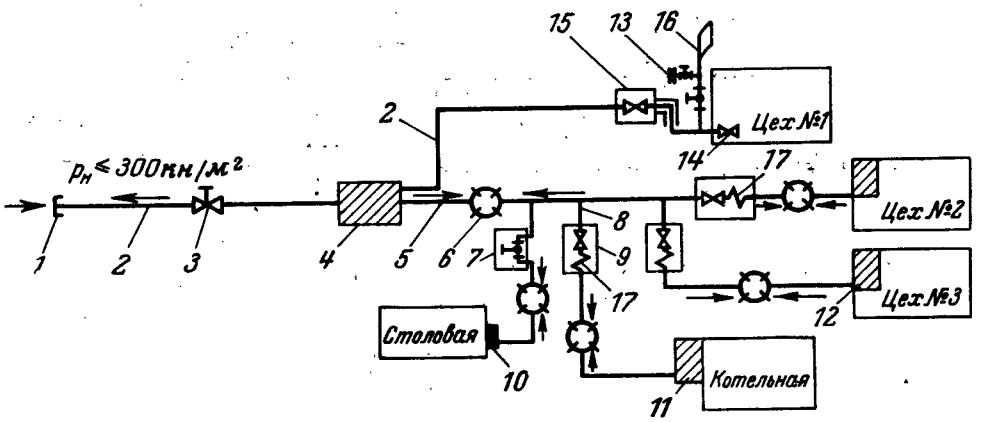


Рис. 10-1. Схема межцеховых газопроводов высокого давления с центральным ГРП высокого и среднего давлений и цеховыми ГРП среднего и низкого давления.

1 — ввод газопровода на территорию завода; *2* — межцеховой газопровод высокого давления; *3* — отключающее устройство с электроприводом; *4* — центральный ГРП; *5* — межцеховой газопровод среднего давления; *6* — сборник конденсата; *7* — отключающее устройство в колодце; *8* — ответвление газопровода к цеху; *9* — отключающее устройство с компенсатором — в колодце; *10* — шкафная редукционная установка; *11* — цеховой ГРП среднего давления; *12* — цеховой ГРП низкого давления; *13* — штуцер для взятия пробы газа; *14* — задвижка на вводе газопровода в цех; *15* — отключающее устройство в колодце; *16* — продувочный газопровод и свеча в атмосферу; *17* — линзовый компенсатор.

бесшовных труб малоуглеродистой стали и могут быть подземными или надземными с укладкой их на специальных опорах. Надземные газопроводы доступны для осмотра и ремонта и более безопасны, а потому им отдается предпочтение. Цеховые же газопроводы выполняются только надземными, что обеспечивает хороший их осмотр и необходимую безопасность персонала. Очень важно снабдить газопроводы устройствами для компенсации температурных удлинений труб; конструкция линзового компенсатора показана на рис. 10-2. Газопроводы сооружаются, испытываются и эксплуатируются со строгим соблюдением технических правил, разработанных Госгортехнадзором.

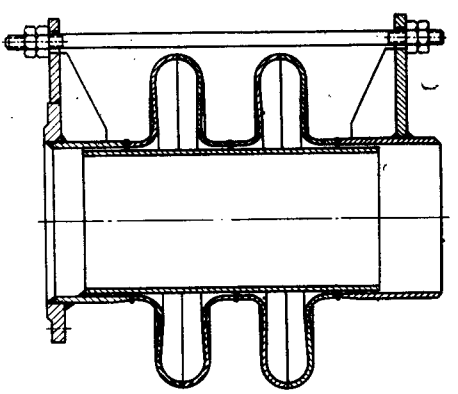


Рис. 10-2. Двухлинзовый компенсатор.

Схема газорегулировочного пункта зависит от масштаба потребления газа, системы газоснабжения потребителей и системы автоматического регулирования. Простая схема газорегулировочного пункта (ГРП) показана на рис. 10-3.

Газ редуцируется с начального давления $p_н = 0{,}3$ *Мн/м²* до конечного давления $p_к = 5$ *кн/м²* при помощи мембранного регулятора давления, имеющего выносной импульс. Газорегулировочный пункт обору-

дован: газовым фильтром для улавливания механических частиц; предохранительным запорным устройством для выключения газа в случае чрезмерного повышения или понижения давления; регулятором давления, снижающим давление и автоматически поддерживающим давление «после себя»; обводным газопроводом (байпасом) на случай выхода из строя регулятора или его ремонта с ручной регулировкой давления; предохранительным выхлопным клапаном; контрольно-изме-

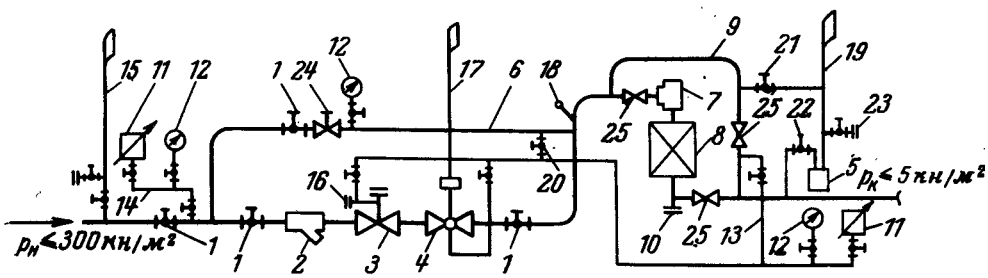


Рис. 10-3. Схема ГРП с регулятором на малую производительность (типа РД-50).

1 — краи; *2* — газовый фильтр; *3* — предохранительный запорный клапан; *4* — регулятор давления; *5* — гидравлический предохранитель; *6* — обводной газопровод; *7* — фильтр-ревизия; *8* — газовый счетчик; *9* — обводной газопровод; *10* — угольник с пробкой; *11* — регистрирующий манометр; *12* — показывающий манометр; *13* — импульсный трубопровод конечного давления; *14* — то же начального давления; *15* — продувочный трубопровод; *16* — штуцер с пробкой; *17* — сбросная трубка от регулятора; *18* — термометр; *19* — продувочный трубопровод; *20* — перемычка с краном для настройки регулятора; *21* — перемычка с краном; *22* — краи на приемном штуцере гидравлического предохранителя; *23* — штуцер для взятия пробы; *24* — вентиль; *25* — задвижка.

рительными приборами (манометры, термометры, газовый счетчик или регистрирующий расходомер). Отечественная промышленность выпускает регуляторы давления вентильного типа на перепад давления от начального $p_н = 1{,}2$ *Мн/м²* до конечного $p_к = 100 \div 0{,}5$ *кн/м²*, рассчитанные на пропуск газа до 15 000 *м³/ч*. При большем расходе газа (300 000—500 000 *м³/ч*) применяются разработанные Мосэнергопроектом регуляторы давления с поворотными заслонками, встроенными непосредственно в газопровод и управляемыми электронными регуляторами.

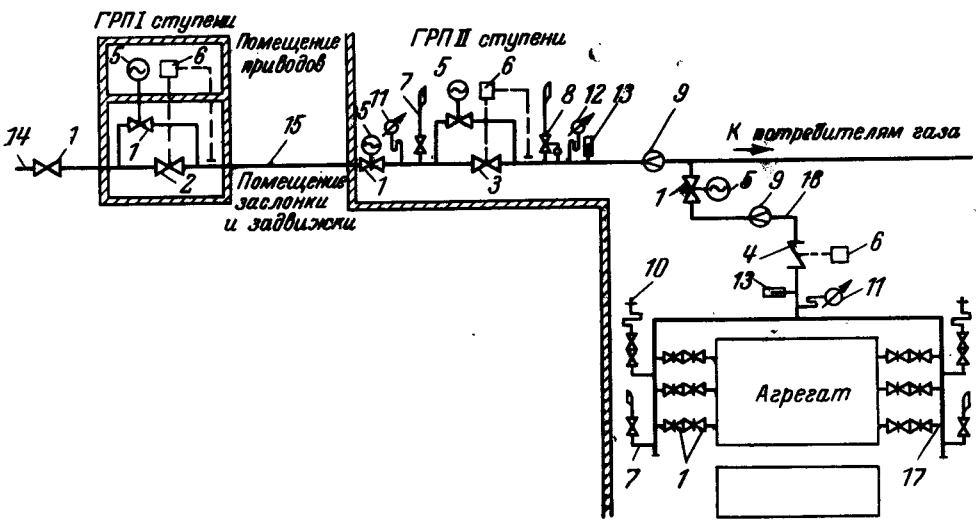


Рис. 10-4. Схема двухступенчатого редуцирования газа (ГРП) на производительность до 150 000 *м³/ч* с начальным давлением 1—6 *бар*.

1 — запорная задвижка; *2* — дроссельная заслонка I ступени; *3* — дроссельная заслонка II ступени; *4* — заслонка регулировочного расхода; *5* — электропривод; *6* — колонка дистанционного управления заслонкой; *7* — продувочная свеча; *8* — предохранительный клапан; *9* — диафрагма расходомера; *10* — запальник; *11* — манометр указывающий; *12* — манометр регистрирующий; *13* — термометр; *14* — подводящий газопровод; *15* — участок подземного газопровода; *16* — газопровод к агрегату; *17* — газопровод к горелке.

Схема ГРП с двухступенчатым редуцированием газа на производительность до 150 000 *м³/ч* показана на рис. 10-4. Избыточное давление газа в цеховом газопроводе 20—40 *кн/м²* в зависимости от газогорелочных устройств и длины газопровода. Если начальное давление $p_н = 0{,}3 \div 0{,}6$ *Мн/м²*, то дросселирование осуществляется в двух последовательных ступенях: в 1-й ступени с 0,3—0,6 до 0,1 *Мн/м²* и во 2-й ступени со 100 до 20—40 *кн/м²*. Дроссельная заслонка 1-й ступени устанавливается в отдельном здании, а дроссельная заслонка 2-й ступени — в пристройке к цеху. За дроссельной заслонкой устанавливается предохранительный клапан. Управление заслонками 1-й и 2-й ступеней дросселирования производится электронным регулятором, воздействующим на колонку дистанционного управления (с отбором импульса «после себя» от газопровода за заслонками).

Цеховые газопроводы, назначение которых заключается в подаче газа к агрегатам, укладываются обычно в виде тупиковых ответвлений. Учитывая чистоту природного газа и высокое качество оборудования, нет необходимости прибегать к сложным кольцевым схемам, позволяющим подавать газ с разных сторон газопровода. При большой протяженности тупиковых ветвей устанавливаются отключающие устройства, позволяющие отсоединять отдельные участки для ремонта. Для быстрого прекращения подачи газа высокого давления целесообразно иметь электропривод на отключающем устройстве.

При большом расходе газа вместо счетчиков ставят регистрирующие дифманометры с мерными шайбами. Цеховые газопроводы снабжаются продувочной свечой, отводящей газ при продувке их в атмосферу.

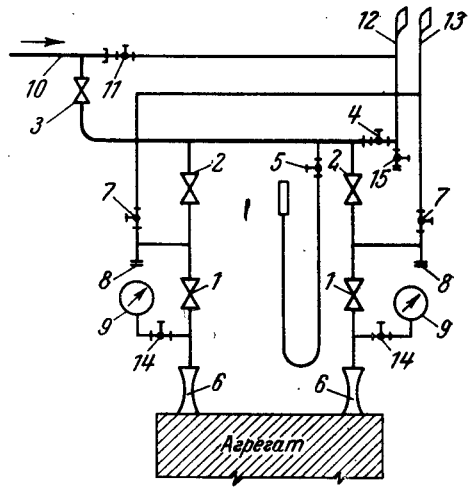


Рис. 10-5. Схема газопроводов на агрегате (печи).

1 — отключающее устройство; *2* — контрольное отключающее устройство; *3* — главное отключающее устройство; *4* — краи для продувки; *5* — краи для запальника; *6* — газовая инжекционная горелка; *7* — краи на трубопроводе безопасности; *8* — штуцер для взятия пробы; *9* — показывающий манометр; *10* — цеховой газопровод; *11* — краи для продувки; *12* — продувочный газопровод; *13* — трубопровод безопасности; *14* — краи маиометра; *15* — кран для взятия пробы.

Газопроводы на самом агрегате (печи) называются обвязочными. Примерная схема обвязочного газопровода приведена на рис. 10-5. (Агрегат оборудован однопроводными инжекционными горелками. Газ поступает от цехового газопровода. Система имеет главную задвижку и по две задвижки (или крана) на каждом ответвлении к горелке, из них одна рабочая — для регулировки давления газа по манометру, вторая задвижка является контрольной, увеличивающей гарантию плотности отключения газа от агрегата. Горелки снабжены запальниками для зажигания газа и продувочным устройством со свечами, соединенными с атмосферой. Перед пуском агрегата соблюдаются правила техники безопасности: сначала продувается газопровод через свечу при закрытой главной задвижке, после этого продувается ответвление к агрегату, для чего открываются задвижка и краны на продувочном трубопроводе и на трубопроводе безопасности. Все остальные задвижки должны быть закрыты. Окончание продувки определяется анализом газа, взятого через штуцер. После проверки герметичности обвязочного устройства за счет тяги или путем подачи воздуха продувается рабочее пространство. При пуске газовой горелки зажженный запальник вносится в топку

до открытия рабочей и контрольной задвижек и подается постепенно газовоздушная смесь. При остановке агрегата открывается кран трубопровода безопасности и газ, просочившийся через неплотности задвижек, выходит в атмосферу.

10-2. ЗНАЧЕНИЕ ОХРАНЫ ТРУДА

Выше, в гл. 9, даны основные сведения о токсичности горючих газов и о мерах по обнаружению утечек газа путем его одорирования. Загазованность воздуха, вызванная утечкой газа в рабочих помещениях, может вызвать отравление людей. Образование газовоздушной смеси в полостях печей, боровов, в газопроводах может быть причиной сильных взрывов. Пределы взрываемости смеси газов с воздухом при 20 °С и 1 *бар* следующие (в процентах газа от объема смеси):

	Нижний предел	Верхний предел
Природный газ	5,1—5,8	12,1—13,9
Коксовый газ	5,6—6	28—30,8
Домеиный газ	35—40	65—73
Генераторный газ	~20	~74

Взрывоопасная смесь образуется в силу разных причин: недостаточного удаления воздуха из газопроводов перед пуском цеховых агрегатов, присосов воздуха и т. д. Чаще всего имеют место взрывы в агрегатах и газопроводах и реже в помещениях.

Для предотвращения отравлений и взрывов необходимо, чтобы устройство, монтаж и эксплуатация газового хозяйства, в том числе газопроводов и газовых печей, производились бы со строгим соблюдением правил охраны труда. Особенно необходимо, чтобы: а) была высокой и отвечала нормам испытаний на плотность герметичность газопроводов и всех элементов газового хозяйства; б) осуществлялся систематический надзор за газовым хозяйством для своевременного предотвращения утечек газа и их ликвидации; в) персонал был хорошо обучен.

10-3. РАСЧЕТ ГАЗОПРОВОДОВ

При проектировании определяют диаметры газопроводов, исходя из величины допускаемой потери давления на рассматриваемых участках и количеств газа, которые требуется передать по трубопроводам. При поверочных расчетах, когда известны размеры газопровода — диаметр и длина, определяют величину падения давления на каждом участке при заданном количестве газа, проходящего через газопровод, которое может быть выражено формулой

$$V = 3\,600 \frac{\pi D^2}{4} w_1, \ м^3/ч; \qquad (10\text{-}1)$$

здесь w — средняя по сечению скорость газа, *м/сек*; D — диаметр газопровода, *м*; V — количество газа при фактическом состоянии, т. е. при заданных его давлении и температуре, $м^3$.

Пересчет действительного объема на объем при нормальных или стандартных условиях производится на основе характеристического уравнения. Если первое состояние газа характеризуется абсолютным давлением p_1 и абсолютной температурой T_1, а второе соответственно p_2 и T_2, то

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{p_2 T_1}{p_1 T_2}, \qquad (10\text{-}2)$$

где ρ_1 и ρ_2 — плотности газа при первом и втором состояниях, $кг/м^3$; v_1 и v_2 — удельные объемы газа, $м^3/кг$.

В газопроводах низкого давления, когда избыточное давление газа составляет до 5 *кн/м²*, а абсолютное давление газа мало отличается от нормального (10 332 *дан/м²*), можно считать, что $p_2/p_1 \approx 1$ и тогда

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}. \qquad (10\text{-}3)$$

Условием неразрывности потока в двух его сечениях f_1 и f_2 является уравнение

$$f_1 w_1 \rho_1 = f_2 w_2 \rho_2, \qquad (10\text{-}4)$$

откуда следует, что для газопровода неизменного сечения

$$w_1 \rho_1 = w_2 \rho_2. \qquad (10\text{-}4а)$$

Газ движется по трубопроводу за счет перехода потенциальной энергии сжатого газа в кинетическую; при движении его часть кинетической энергии расходуется на работу трения и далее переходит в тепло. На преодоление сопротивлений при движении газа на данном участке газопровода может быть израсходован перепад давления $\Delta p = p_н - p_к$, где $p_н$ и $p_к$ — начальное и конечное давления газа.

Допустим, что мы имеем газопровод низкого давления с $p_н = 3$ *кн/м²*. Если этот газопровод имеет длину $l = 100$ *м* и внутренний диаметр $D = 100$ *мм*, то при движении природного газа в количестве $V = 21{,}9$ *м³/ч* потеря давления составит $\Delta p = 10$ *н/м²*, а при пропуске $V = 671$ *м³/ч* падение давления составит $\Delta p = 5$ *кн/м²*, причем скорость газа во втором случае будет $w = 23{,}5$ *м/сек*. Ясно, что второй случай неосуществим, так как $\Delta p > p_н$, а в первом случае падение давления слишком мало, что говорит о недостаточном использовании газопровода.

Перепад давления газа от регулятора давления ГРП до газовой горелки зависит главным образом от характера работы технологического агрегата; этот перепад не должен превышать допустимого, величину которого до наиболее удаленной горелки в процентах от номинального давления газа перед горелками можно принимать для печей, оборудованных: а) инжекционными горелками среднего давления 10—15%; б) инжекционными горелками низкого давления 20—25%; в) смесительными горелками 40—50%.

Следует помнить, что расход газа агрегатами часто бывает переменным, поэтому перепад давлений определяется и тепловой нагрузкой агрегата. Если в приведенном выше примере считать величину допустимого падения давления 0,5 *кн/м²*, то через газопровод с диаметром $D = 100$ *мм* можно передать газ в количестве $V = 200$ *м³/ч*. Скорость газа в этом случае составит $w = 8$ *м/сек*.

Определять диаметр газопровода по формуле (10-1), задаваясь скоростью газа, можно только при ориентировочных (прикидочных) расчетах. При гидравлическом (аэродинамическом) расчете прямолинейных газопроводов в основу расчета берется формула Дарси для определения потерь давления на трение:

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{D} \frac{w^2}{2} \rho, \ н/м^2; \qquad (10\text{-}5)$$

здесь λ — коэффициент трения, зависящий от характера движения, от величины критерия Рейнольдса Re и относительной шероховатости труб e/D; l и D — длина и внутренний диаметр газопровода, *м*; w — средняя действительная скорость газа, *м/сек*; ρ — плотность газа, *кг/м³* (при заданных условиях).

Формула (10-5) справедлива для несжимаемой среды и поэтому может быть использована для расчета газопроводов низкого давления

(до 5 *кн/м²*). Коэффициент трения для ламинарного режима движения при $Re \leqslant 2\,300$ определяется по формуле Пуазейля

$$\lambda = \frac{64}{Re}, \tag{10-6}$$

для переходного режима при $Re = 2\,300 \div 4\,000$ — по формуле Зайченко

$$\lambda = 0{,}0025 \sqrt[3]{Re}, \tag{10-7}$$

для турбулентного режима при $Re > 4\,000$ — по формуле Альтшуля

$$\lambda = 0{,}11 \left(\frac{e}{D} + \frac{68{,}5}{Re} \right)^{0{,}25}. \tag{10-8}$$

Кроме потерь от трения на прямых участках газопровода имеют место потери местные: при поворотах, при изменении сечений, в вентилях и задвижках и т. п. Местные потери рассчитываются по формуле

$$\Delta p_м = \sum \zeta \frac{w^2}{2} \rho, \; н/м^2. \tag{10-9}$$

где ζ — коэффициент местных потерь, значение которого берется из справочников.

При расчете местные потери удобно учитывать увеличением длины газопровода, заменяя каждую потерю эквивалентной длиной:

$$l_{экв} = \frac{\zeta D}{\lambda}. \tag{10-10}$$

Общая длина (расчетная), следовательно, равна сумме $l + l_{экв}$.

Расчет газопроводов низкого давления. Для газопроводов низкого давления с избыточным давлением до 5 *кн/м²* можно пренебречь изменением плотности газа по длине трубопровода. Соединяя формулы (10-1) и (10-5), находим падение давления в газопроводе для ламинарного режима:

$$\Delta p = 1{,}132 \cdot 10^6 \frac{V}{D^4} l \rho \nu, \; н/м^2; \tag{10-11}$$

здесь Δp — потеря давления газа на расчетном участке, *н/м²*; V — объем газа, проходящего по трубопроводу при действительной температуре, *м³/ч*; l — длина газопровода, *м*; D — его диаметр, *см*; ν — коэффициент кинематической вязкости газа при нормальных условиях, *м²/сек*; ρ — плотность газа при нормальных условиях, *кг/м³*.

В этой формуле для природного газа можно принимать $\rho = 0{,}73$ *кг/м³*; $\nu = 14{,}3 \cdot 10^{-6}$ *м²/сек*.

Для критического режима можно получить формулу

$$\Delta p = 0{,}515 \frac{V^{2\,1/3}}{D^{5\,1/3} \nu^{1/3}} \rho l, \; н/м^2. \tag{10-12}$$

Для турбулентного режима

$$\Delta p = 68{,}75 \left(\frac{e}{D} + 1922 \frac{\nu D}{V} \right)^{0{,}25} \frac{V^2}{D^5} \rho l, \; н/м^2; \tag{10-13}$$

здесь e — абсолютная шероховатость стенок труб, *см*; для стальных труб $e = 0{,}01$ *см*.

Расчет газопроводов среднего и высокого давления. Плотность газа в газопроводах среднего и высокого давлений, а следовательно, и скорость w и расхода газа V в этом случае меняются по длине газопровода, поэтому вывод расчетной формулы следует

выполнить в дифференциальной форме. Формула Дарси имеет для бесконечно малого участка dl вид

$$dp = -\lambda \frac{dl}{D} \frac{w^2}{2} \rho. \tag{10-14}$$

Пользуясь уравнением Клапейрона, можно написать:

$$w^2\rho = w_0^2 \rho_0 \frac{p_0}{p} \frac{T}{T_0}. \tag{10-15}$$

Индекс 0 означает, что соответствующие величины относятся к нормальным условиям. Подставляя выражение (10-15) в уравнение (10-14) и интегрируя в пределах от $p_н$ до $p_к$, имеем:

$$-\int_{p_н}^{p} p dp = \lambda \frac{w_0^2 \rho_0 p_0 T}{2DT_0} \int_0^l dl \tag{10-16}$$

или

$$\frac{p_н^2 - p_к^2}{2} = \lambda \frac{l}{D} \frac{w_0^2}{2} \rho_0 \frac{p_0 T}{T_0}. \tag{10-17}$$

Если длину выразить в километрах, диаметр — в сантиметрах, давление (абсолютное) — в ньютонах на квадратный метр и заменить скорость через часовой расход газа, получим расчетную формулу

$$\frac{p_н^2 - p_к^2}{L} = 126\,200\lambda \frac{V_0^2}{D^5} \rho_0 \frac{T}{T_0}. \tag{10-18}$$

Принимая отношение $T/T_0 = 1$ и пользуясь формулой Альтшуля, получаем для турбулентного режима:

$$\frac{p_н^2 - p_к^2}{L} = 1\,3950\left(\frac{e}{D} + 1\,922\frac{D\nu}{V_0}\right)^{0,25} \frac{V_0^2}{D^5} \rho_0, \tag{10-19}$$

где L — длина газопровода, *км*; D — внутренний диаметр, *см*; $p_н$ и $p_к$ — абсолютные давления газа в начале и в конце газопровода, *кн/м²*; V_0 — расход газа, *м³/ч*; ν — кинематическая вязкость газа, *м²/сек*; e — эквивалентная абсолютная шероховатость стенки трубы ($e = 0{,}01$ *см*).

Расчет газопроводов очень удобно производить с помощью номограмм [Л. 31].

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ

ПРОИЗВОДСТВО ИСКУССТВЕННЫХ ГАЗОВ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

11-1. СУЩНОСТЬ СУХОЙ ПЕРЕГОНКИ ТОПЛИВА

Сухая перегонка твердого топлива осуществляется путем нагревания топлива в ретортах специальных печей без доступа воздуха. Топливо при таком нагревании разделяется на две части (рис. 11-1) — летучие (газообразные) вещества и твердый остаток — кокс, причем выделение летучих веществ заканчивается при 1 100—1 200 °С. Содержание летучих веществ в процентах от горючей массы составляет:

Для древесины	85
Для торфа	74
Для бурых углей	30—60
Для каменных углей	8—50
Для антрацита	3—7

При нагреве топлива без доступа воздуха связи между отдельными атомами и звеньями атомов ослабевают. Сложные органические молекулы, имеющие наименее прочные связи, распадаются на более простые звенья, причем получаются новые продукты, способные выдерживать данную температуру. Последним будут распадаться

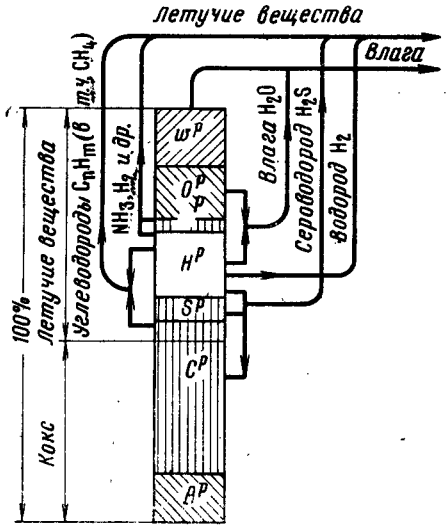


Рис. 11-1. Схема разделения топлива при его сухой перегонке.

самые простые углеводороды — метан CH_4, этилен C_2H_4 и др. Наиболее прочными являются молекулы метана CH_4, которые разрушаются при температуре выше 600 °С, распадаясь по схеме

$$CH_4 \longrightarrow C + 2H_2.$$

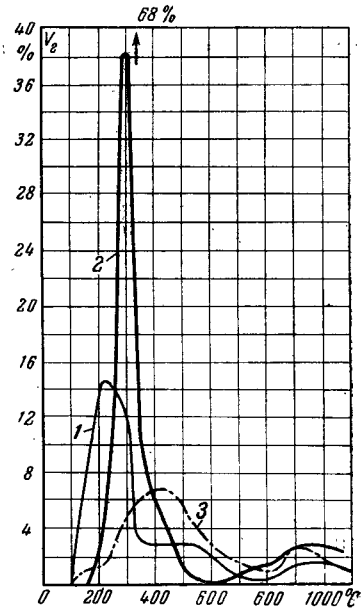


Рис. 11-2. Выход летучих при различных температурах нагрева.

1 — торф; *2* — древесина; *3* — бурый уголь.

Температура начала разложения зависит от возраста топлива. Чем моложе топливо, т. е. чем оно богаче кислородом, тем при более низкой температуре начинается разложение. Эта температура составляет для древесины и торфа 100—160 °С, для бурых углей 130—170 °С, для каменных углей 170—300 °С.

При нагревании топлива сначала при 100—150 °С происходит выделение внешней влаги, затем при 200—250 °С выделяется двуокись углерода и образуются кислородные соединения — внутренняя (пирогенетическая) влага, а также конденсирующиеся пары масел и жирных кислот. В этом температурном интервале начинается также возгонка смолистых веществ (битумов).

В процессе сухой перегонки спекающихся углей при температуре 350—450 °С наступает размягчение топлива и переход его в пластическое состояние, так как содержащиеся в топливе битумы превращаются в жидкость. С переходом топлива в пластическое состояние начинается процесс разложения, при котором из него выделяются углеводородные газы и пары, причем масса топлива, спекаясь вновь начинает затвердевать. При нагревании до 550 °С процесс отгонки смолистых веществ заканчивается. На рис. 11;2 показан выход летучих при различных температурах нагрева.

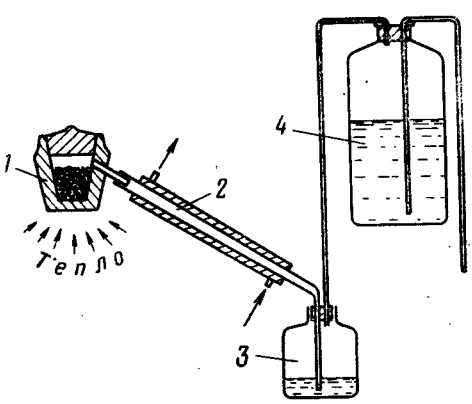


Рис. 11-3. Схема лабораторной установки для исследования сухой перегонки топлива.

1 — реторта; *2* — холодильник; *3* — приемник для конденсата; *4* — газосборник.

При лабораторном исследовании процесса сухой перегонки можно воспользоваться прибором, изображенным на рис. 11-3. Летучие вещества, выделяемые из пробы топлива при нагреве реторты, поступают в холодильник, где конденсируются пары воды и смолы, стекающие в приемник. Неконденсирующиеся газы собираются в аспираторе.

В промышленности сухая перегонка твердого топлива осуществляется двумя способами, имеющими различное назначение.

Первый способ осуществляется при температуре 500—550 °С и носит название полукоксования или швелевания. Второй способ осуществляется при более высоких температурах — до 1 000—1 200 °С и носит название коксования.

При нагревании топлива в процессе полукоксования из него испаряется влага, а также выделяется смола, состоящая из маслянистых продуктов (главным образом, сложных углеводородов, способных конденсироваться в холодильнике). Кроме того, из топлива выделяются в небольшом количестве газы, не способные конденсироваться в обычных условиях, при атмосферном давлении и небольшой температуре (10—20 °С), а именно: двуокись углерода CO_2, окись углерода CO, метан CH_4, тяжелые углеводородные газы C_mH_n, водород H_2 и азот N_2.

Полученная при охлаждении летучих веществ вода, скопляющаяся в нижней части холодильника, носит название подсмольной, скопляющаяся над ней смола называется первичной смолой, газ называется полукоксовым, а твердый остаток — полукоксом.

Подсмольная вода состоит из внешней влаги топлива и пирогенетической влаги, образующейся из некоторой части кислорода топлива (5% общего его количества) и соответствующего количества водорода топлива.

Она содержит в растворенном виде фенолы, уксусную кислоту, метиловый спирт, аммиак, сернистые и другие вещества. В смоле содержатся помимо масел кислые и основные вещества, фенолы и т. д.

Получаемая смола имеет высокое качество и с успехом используется как сырье при производстве искусственного жидкого моторного топлива и масел. Для этого смола подвергается разгонке по фракциям. После полукоксования в твердом остатке — полукоксе содержится еще значительное количество летучих — от 5 до 15%.

При коксовании топлива в результате получается кокс. Теоретически кокс не должен содержать летучих веществ, в действительности процесс не доводится до конца и в коксе остается незначительное количество их. В коксохимической промышленности коксованию подвергают некоторые сорта каменных углей с целью получения металлургического кокса, используемого как топливо для доменных и других шахтных печей.

Летучие вещества при коксовании топлива выделяются в том же порядке, что и при полукоксовании, но их количество и состав получаются другими. Смола, полученная при коксовании, имеет большие вязкость и плотность, так как легкие фракции в условиях высоких температур подвергаются крекингу. Выход продуктов сухой перегонки и их характеристика даны в табл. 11-1.

Таблица 11-1

Выход и характеристика продуктов сухой перегонки угля

Сравниваемые показатели	Полукоксование бурых углей при 500—550 °С	Коксование каменных углей при 1 000—1 100 °С
Выход твердого остатка (полукокса или кокса), % от массы топлива	65—75	75—82
Содержание летучих в твердом остатке, % от горючей массы	8—12	0,5—1
Выход газа:		
% от массы сухого угля	6—8	15—19
на 1 *т* угля, $м^3$	60—80	300—350
Плотность сухого газа, $кг/м^3$	0,8—0,9	0,4—0,5
Низшая теплота сгорания сухого газа, $Мдж/м^3$	8,38—12,57	14,7—18,9
Выход смолы, % от массы сухого угля	10—20	2,5—3,5
Плотность смолы, $т/м^3$	0,9—1,0	1,1—1,2
Выход аммиака, % от массы сухого угля	Следы	0,1—1,35
Содержание жидких погонов в газе, % от массы сухого угля	0,3—0,5 (газовый бензин)	1—1,2 (сырой бензол)

Состав и количество летучих продуктов сухой перегонки зависят от рода топлива и от режима процесса, т. е. от скорости, способа и температуры нагрева топлива.

Назначение сухой перегонки может быть двояким. Если нужно получить твердый остаток — кокс или полукокс, то газ и смола являются сопутствующими продуктами.

При получении в качестве основных продуктов газа и смолы сопутствующим является твердый остаток, от которого не всегда требуют высокого качества.

Примером первого случая может служить получение древесного кокса (древесного угля) в углевыжигательных печах, а примером второго случая — производство светильного газа для бытового потребления.

Сухая перегонка топлива может происходить не только в закрытых сосудах, но и при пропускании через слой топлива горячих газов, не содержащих кислорода; при этом подогрев топлива происходит за счет физического тепла газов. В этом случае парообразные и газообразные продукты смешиваются с теплоносителем. Такой прогрев топлива происходит, например, в верхней части газогенераторов: через зону сухой перегонки проходят горячие газы из зоны газификации, к ним примешиваются пары смолы и газообразные углеводороды, а в самой верхней части газогенератора происходит сушка загруженного топлива, причем пары воды также примешиваются к газам.

11-2. ПОЛУКОКСОВАНИЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА И ПОЛУКОКСОВЫЙ ГАЗ

Назначение полукоксования заключается в получении из бурых углей и горючих сланцев первичной смолы, газа и полукокса, пригодных для различных технических целей[1]. Из первичной смолы получают бензин и другие моторные топлива, смазочные масла, фенолы, пек и другие вещества. Процесс ведут при невысокой температуре, чтобы избежать разложения жидких углеводородов на более простые, например на CH_4 и C_2H_4 и пр. Следует отметить, что вследствие незначительных масштабов полукоксования топлив газ, выделяющийся в этом процессе, играет второстепенную роль; его выход составляет от 50 до 150 $м^3$ на 1 $т$ сырья, а теплота сгорания колеблется в пределах 8,4—12,6 $Мдж/м^3$.

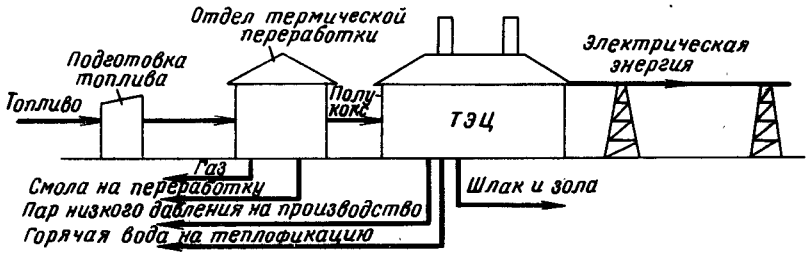


Рис. 11-4. Схема энерготехнологического комбината (ЭТК).

При полукоксовании, как видно из табл. 10-1, выход жидких продуктов больше, чем при коксовании. Полукокс, который получается в количестве от 65 до 74% от сухой массы угля, в ряде случаев бывает хрупким и при хранении на воздухе вследствие высокой реакционной способности легко окисляется до самовозгорания.

Во многих случаях полукокс является прекрасным сырьем для газогенераторного процесса. Из-за плохой транспортабельности полукокса целесообразно полукоксовые установки сочетать с электростанциями или другими централизованными потребителями топлива и весь полукокс использовать непосредственно в топках паровых котлов, а в газогенераторах или в металлургии при трубопроводном транспорте мелкого полукокса. Для топлив с большим выходом смолы (торфа, сланцев и бурых углей) наиболее целесообразным является его комплексное энерготехнологическое использование, разработанное советскими энергетиками и имеющее широкие перспективы развития в СССР.

Современные крупные ТЭЦ снабжают промышленность электрической энергией и теплом. Для более полного использования твердого топлива принципиально возможно строить энерготехнологические комбинаты (ЭТК), предназначенные для снабжения различных отраслей народного хозяйства электроэнергией, теплом, газом и химическим сырьем.

Схема такого ЭТК показана на рис. 11-4. Топливо сначала поступает в особую установку для полукоксования, где в результате переработки получают полукокс, смолу и полукоксовый газ. Полукокс направляется в котельную и используется как топливо под котлами. Смола перекачивается в химический цех, где подвергается разгонке по фракциям с получением бензина, лигроина, керосина, смазочных масел и остатка — смоляного пека (некоторое количество бензина дополнительно улавливается из газа). Полукоксовый газ после необходимой обработ-

[1] Из древесины и торфа первичную смолу получают также при газификации в газогенераторах со швельшахтами или при производстве древесного угля и торфяного кокса.

ки направляется в городскую сеть для использования в качестве топлива в бытовых или промышленных установках.

Тепло к нагреваемому топливу может подводиться разными способами (рис. 11-5): а) обогревом через стенку; б) обогревом газовым теплоносителем в плотном слое, в «кипящем» слое или во взвешенном состоянии (в условиях пневмотранспорта); в) обогревом твердым теплоносителем в предварительно перемешанном плотном или кипящем слое. Кроме того, могут быть комбинированные способы обогрева.

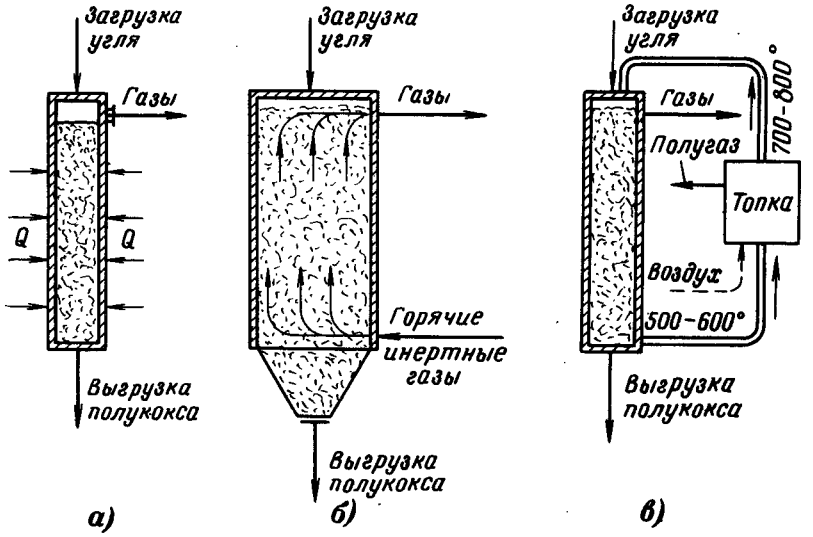


Рис. 11-5. Принципиальные схемы обогрева полукоксовых установок.
а — внешний обогрев; *б* — внутренний обогрев газообразным теплоносителем; *в* — внутренний обогрев твердым теплоносителем.

В печах с внешним обогревом из-за необходимости нагрева до высокой температуры стенок, через которые передается тепло, происходит частичное разложение жидких продуктов, что несколько понижает их качество. Между тем получение этих продуктов является основной целью полукоксования. Для интенсификации процесса и выравнивания температуры топлива в этом случае применяются вращающиеся муфельные печи, но тем не менее производительность таких печей мала.

При внутреннем обогреве газообразным теплоносителем принципиально возможна бо́льшая интенсификация процесса полукоксования за счет теплообмена при прохождении газового потока через слой топлива с большими скоростями. Однако топливо не должно давать пыли, выносимой из печи газовым потоком. Поэтому в таких случаях чаще всего в качестве топлива применяют буроугольные брикеты. Равномерный прогрев топлива и хорошее перемешивание газов также обеспечивают хорошее качество продуктов.

На рис. 11-6 показана схема промышленной полукоксовой печи с внутренним обогревом. Такие печи нашли применение в промышленности. Грохоченый бурый уголь или брикеты из бункера *1* посредством питателя подаются в сушильную зону *2*. Здесь сушка производится за счет тепла, выделяемого в камере сгорания *3* при сжигании газа; продукты горения смешиваются с газами, циркулирующими благодаря вентилятору *4*. Для равномерного распределения подогретого циркуляционного газа служат короба *5*. Удаление газа в атмосферу осуществляется при помощи трубы *6*. После подсушки топливо переходит в зону швелевания *7*, оборудованиую топкой *8*. Продукты горения равномерно вводятся в слой топлива посредством коробов, причем для понижения температуры дымовых газов в топке устанавливается газовый инжектор *9*, создающий разрежение, за счет которого присасывается некоторое количество газов, циркулирующих в зоне полукоксования.

Газы, выделяющиеся в зоне швелевания, выходят через трубопровод *10*, далее проходят обработку с целью извлечения из них смолы и других ценных продуктов

после охлаждения и частично возвращаются в камеру сгорания и топку, а частично отводятся на сторону. Для более быстрого охлаждения полукокса в зоне охлаждения *11* устраивают циркуляцию газа, для чего охлажденный газ из газоочистки возвращается в печь через трубопровод *12*.

Низшая теплота сгорания газа в этих условиях составляет около 7,12 *Мдж/м*³. Одна печь перерабатывает 300—350 *т* буроугольных брикетов в сутки. При обогреве газовым теплоносителем процесс теплопередачи может идти интенсивно, но требуются большие количества горячего газа, что делает установку громоздкой. Недостатками описанной печи являются: невозможность использования рядового угля (с мелочью), низкая теплота сгорания газа (из-за разбавления его продуктами горения) и относительно невысокая производительность агрегата.

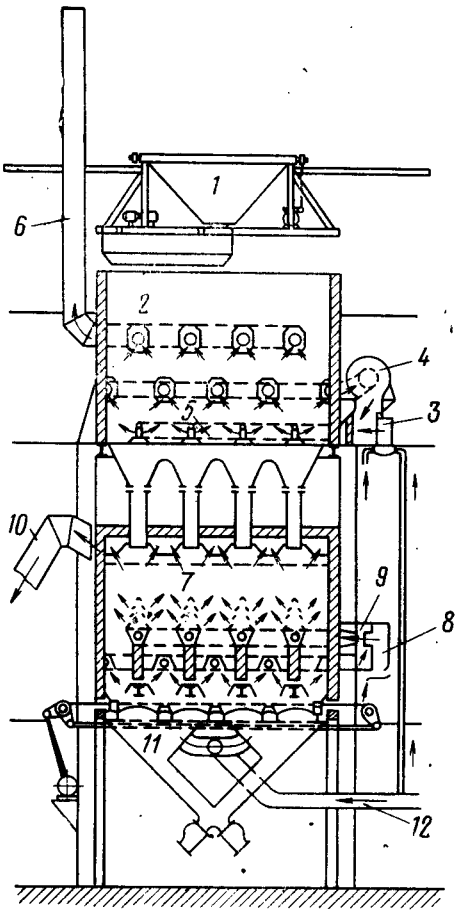


Рис. 11-6. Схема промышленной полукоксовой установки.

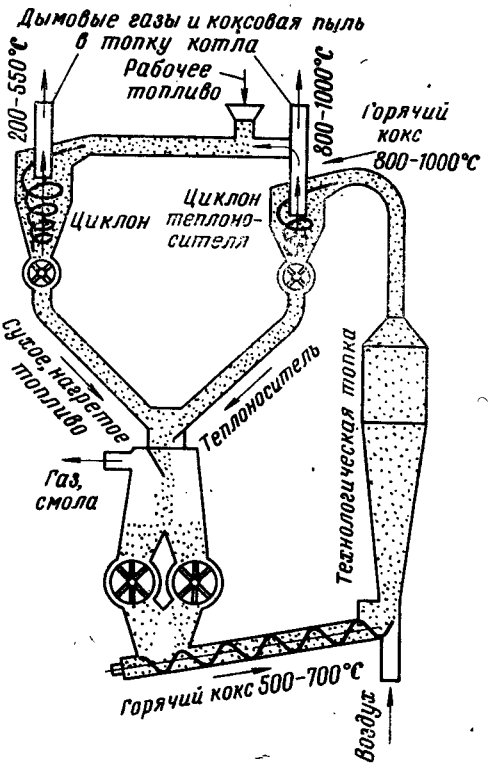


Рис. 11-7. Схема установки для полукоксования с твердым теплоносителем.

Энергетическим институтом им. Г. М. Кржижановского (ЭНИН) и Институтом горючих ископаемых Академии наук СССР разработаны новые способы полукоксования, позволяющие резко интенсифицировать процесс и, следовательно, строить агрегаты с большей производительностью.

Сюда относится полукоксование во взвешенном состоянии, когда частицы топлива взвешены в потоке горячего теплоносителя. Благодаря большой удельной поверхности (на 1 *кг* угля) теплоотдача от газов протекает весьма интенсивно, особенно при полукоксовании угольной пыли.

Весьма перспективно полукоксование с твердым теплоносителем, когда необходимое тепло вводится не с газообразным, а с твердым теплоносителем (с нагретым полукоксом или с другими материалами).

На рис. 11-7 показана схема полукоксования с твердым теплоносителем, предложенная ЭНИН. По этому способу шихта с размером ку-

сочков 1—12 *мм* поступает в сушилку — нагреватель для подсушки и предварительного нагрева во взвешенном состоянии до 300—400 °С, затем проходит циклонный сепаратор (отделение топлива от газов), далее реактор или камеру термического разложения, где идет нагревание до 500—650 °С с выделением парогазовой смеси и получением полукокса. В реакторе догрев идет очень интенсивно за счет смешения топлива с раскаленным полукоксом, нагретым в особой топке с «кипящим» слоем до 800—1 000 °С. Процесс сухой перегонки регулируется изменением температуры в реакторе. Такая установка также имеет высокую производительность, так как прогрев зерен топлива идет очень быстро. Полученный в топке полугаз используется как энергетическое топливо (для нагрева воздуха). В нижней части печи и в этом случае имеется зона для охлаждения полукокса перед выгрузкой (на рисунке не показана).

Помимо описанных установок, полукоксование производится при газификации древесины и торфа в газогенераторах со швельшахтами или в слоевых топках-генераторах паровых котлов, работающих на тех же топливах.

11-3. КОКСОВАНИЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА И КОКСОВЫЙ ГАЗ

В коксохимической промышленности очень широко применяется коксование каменных углей с целью получения кокса для доменных печей, литейных вагранок и т. д. Для этого используются спекающиеся каменные угли. В СССР к таковым относятся некоторые марки донецких, кузнецких и карагандинских углей с выходом летучих около 20%.

Угли подвергаются обогащению с целью уменьшения их зольности, причем обогатительные установки часто сооружаются при коксохимических заводах. Уменьшение зольности кокса резко улучшает работу доменных печей, и поэтому технике обогащения уделяется большое внимание. Преимущественное распространение получил мокрый способ обогащения при помощи отсадочных машин, отделяющих пустую породу от угля. Процессу разделения (отсадки) предшествует предварительная обработка угля, заключающаяся в дроблении, грохочении и обеспыливании. В результате обогащения получают концентрат и отходы углеобогащения — продукт, хвосты, пыль, шлам и породу. Промпродукт имеет зольность сухой массы $A^c \approx 35\%$ и рабочую влажность $W^p \approx 12\%$, а хвосты содержат A^c до 40—80% и $W^p \approx 10\%$. Отходы углеобогащения направляются на электростанции, где сжигаются под котлами.

Выход кокса составляет 75—82% массы исходного угля; в газ переходит 16—20% теплоты сгорания угля. Это соответствует тому, что практически из 1 *т* угля получается около 300—350 $м^3$ газа с теплотой сгорания 14,7—18,9 *Мдж*/$м^3$, а также другие продукты, указанные в табл. 11-1.

Процесс коксования осуществляется в печах, состоящих из ряда узких вертикальных камер (реторт), выложенных из огнеупорного динасового кирпича; эти печи работают на газообразном топливе, причем дымовые газы обогревают их снаружи. Камеры современных коксовых печей работают периодически (что является одним из их недостатков). Загруженная в печь угольная шихта находится в ней до превращения в кокс, который затем удаляется, в печь загружается новая порция угольной шихты, и начинается новый цикл. Продолжительность периода коксования в зависимости от качества топлива и других условий составляет 10—14 *ч*.

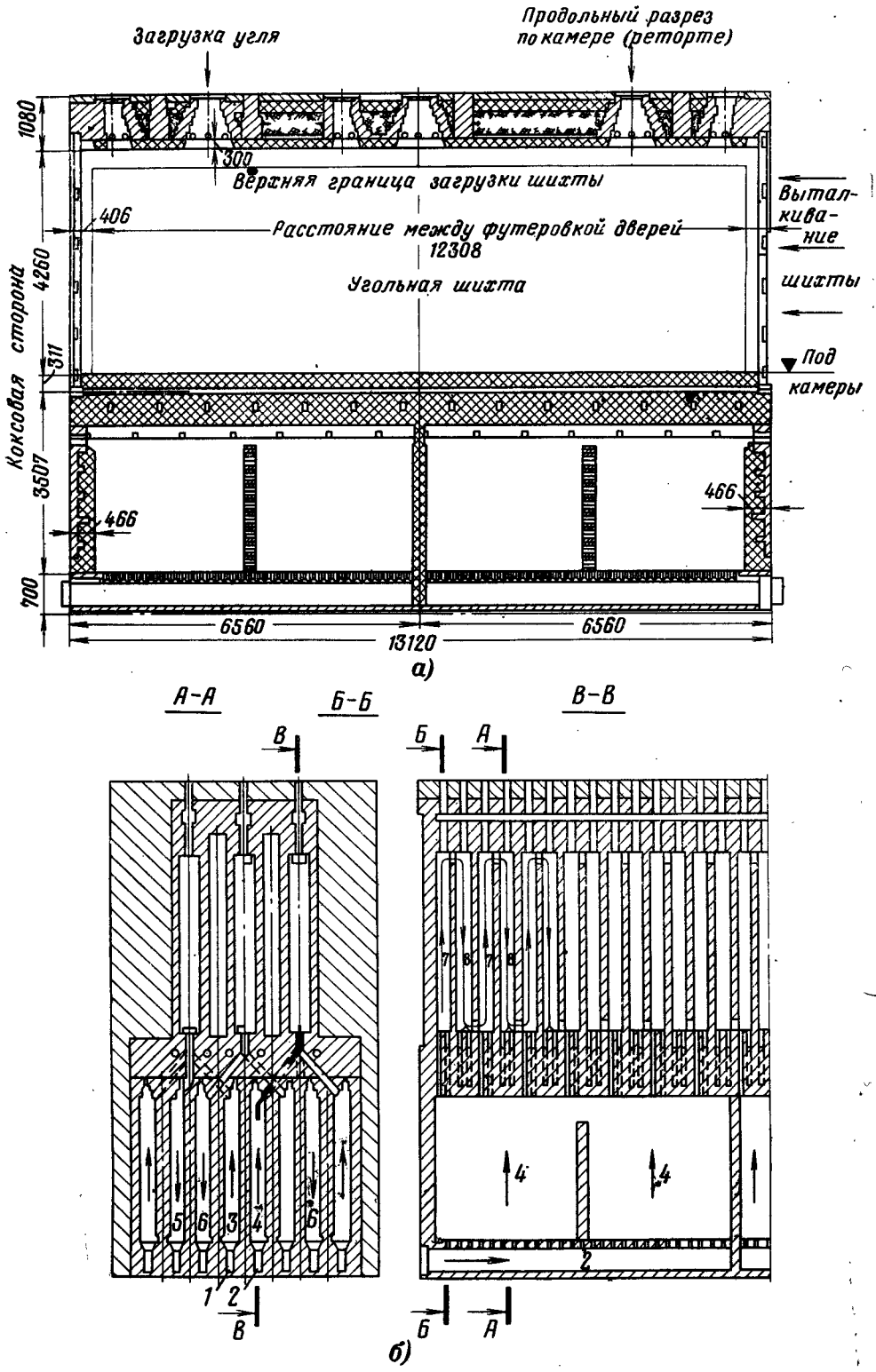


Рис. 11-8. Коксовая печь Гипрококса.

Коксовые печи новой конструкции представляют собой батареи из 65 камер шириной 0,41 *м*, длиной 16,0 *м* и высотой 7 *м*, емкость каждой камеры 41,6 $м^3$ и к. п. д. 86%. Камеры коксовых батарей старой конструкции имеют ширину 0,425 *м* и емкость 30 $м^3$; число камер — 77.

Основным фактором, определяющим протекание процесса коксования углей, является интенсивность передачи тепла дымовых газов в толщу угольной шихты, которая при прочих равных условиях обратно пропорциональна температуропроводности шихты (очень малой по своей величине) и прямо пропорциональна квадрату половины ширины «коксового пирога». Поэтому камеры коксовых печей делаются очень узкими (400 *мм*), а стенки их — тонкими (140 *мм*).

На рис. 11-8 показаны поперечный и продольный разрезы печи Гипрококса (изображенная на рисунке батарея условно состоит из двух камер). Уголь загружается в печь через люки, кокс выгружается через двери, футерованные огнеупорным кирпичом. Коксовые печи отапливаются смешанным коксодоменным газом с теплотой сгорания 4,19—4,62 *Мдж/м*^{3}. Опыт показывает, что при отоплении их одним доменным газом с теплотой сгорания 3,52—3,61 *Мдж/м*^{3} резко увеличивается продолжительность коксования из-за более низкой температуры продуктов горения. Газ и воздух поступают через клапаны в подовые каналы *1* и *2*, ведущие с обеих сторон в газовый *3* и воздушный 4 регенераторы для подогрева газа и воздуха. Из регенераторов газ и воздух по косым ходам поступают в обогревательные (топочные) каналы. Горение в обогревательных каналах (вертикалах) происходит по всей длине камеры попеременно — то в четных, то в нечетных вертикалах. Продукты горения газа переходят через верхний перевал вертикалов в косые ходы, ведущие в регенераторы *5* и *6*, затем в подовые камеры регенераторов, а затем через клапаны и коллекторы — к дымовой трубе. Через определенный промежуток времени направление движения газов меняется на обратное, что достигается путем переключения клапанов, и те регенераторы, которые нагревались дымовыми газами, начинают подогревать газ и воздух, а остывшие регенераторы, в которых в предыдущий период нагревались газ и воздух, включаются на разогрев уходящими газами.

Готовый кокс с температурой 900—1 100 °С при помощи механизма выталкивателя удаляется через двери в специальный тушильный вагон, где он должен быть быстро потушен во избежание горения на воздухе. Для этого он увлажняется водой, причем температура его снижается до 100 °С. Часть воды поглощается коксом, и его влажность увеличивается до 6%, в связи с чем на 1 *кг* кокса теряется 1,47 *Мдж* тепла. При охлаждении водой раскаленный кокс растрескивается, образуя мелочь и пыль, что снижает его качество. Физическое тепло раскаленного кокса составляет 40—50% всего химически связанного тепла топлива, используемого для обогрева печей. Отсюда понятно, насколько важно использовать тепло раскаленного кокса, что возможно при помощи сухого тушения кокса.

Идея сухого тушения кокса заключается в том, что через слой кокса, помещенного в закрытую камеру, происходит циркуляция по замкнутому циклу газообразного инертного теплоносителя, осуществляемая при помощи циркуляционного вентилятора. Газ отбирает тепло от раскаленного кокса и передает его испарительной поверхности котла-утилизатора. В котле вырабатывается пар в количестве 340—450 *кг* на 1 *т* кокса. На рис. 11-9 показана установка сухого тушения кокса, состоящая в основном из тушильного бункера, котла-утилизатора и циркуляционного дымососа. Раскаленный кокс загружается скиповым подъемником в бункер и продувается инертными газами, которые нагреваются в нем до 800 °С, после чего проходят через котел-утилизатор, отдавая тепло на выработку пара, и возвращаются с температурой 180—200 °С. При пуске установки воздух продувается через раскаленный кокс, и часть последнего выгорает. Кроме того, около 1% кокса выгорает из-за присосов воздуха, что ухудшает качество кокса и является недостатком способа сухого тушения кокса. Пар получается с давлением 40 *бар* и температурой 450 °С; паропроизводительность котла доходит до 50 *т/ч*.

Количество циркулирующих газов составляет до $180 \cdot 10^3$ *м³/ч*, производительность по коксу — до 120 *т/ч*. Капитальные затраты окупаются за 2,7 года. Эти цифры говорят о высокой экономической эффективности сухого тушения кокса. Кроме того, по сравнению с мокрым тушением улучшается качество кокса — снижается его влажность и уменьшается содержание мелких фракций. Однако более сложная эксплуатация затрудняет внедрение таких установок в практику коксохимического производства.

Коксовый газ, выходящий из печи, является в значительной степени продуктом разложения углеводородов, происходящего при высоких тем-

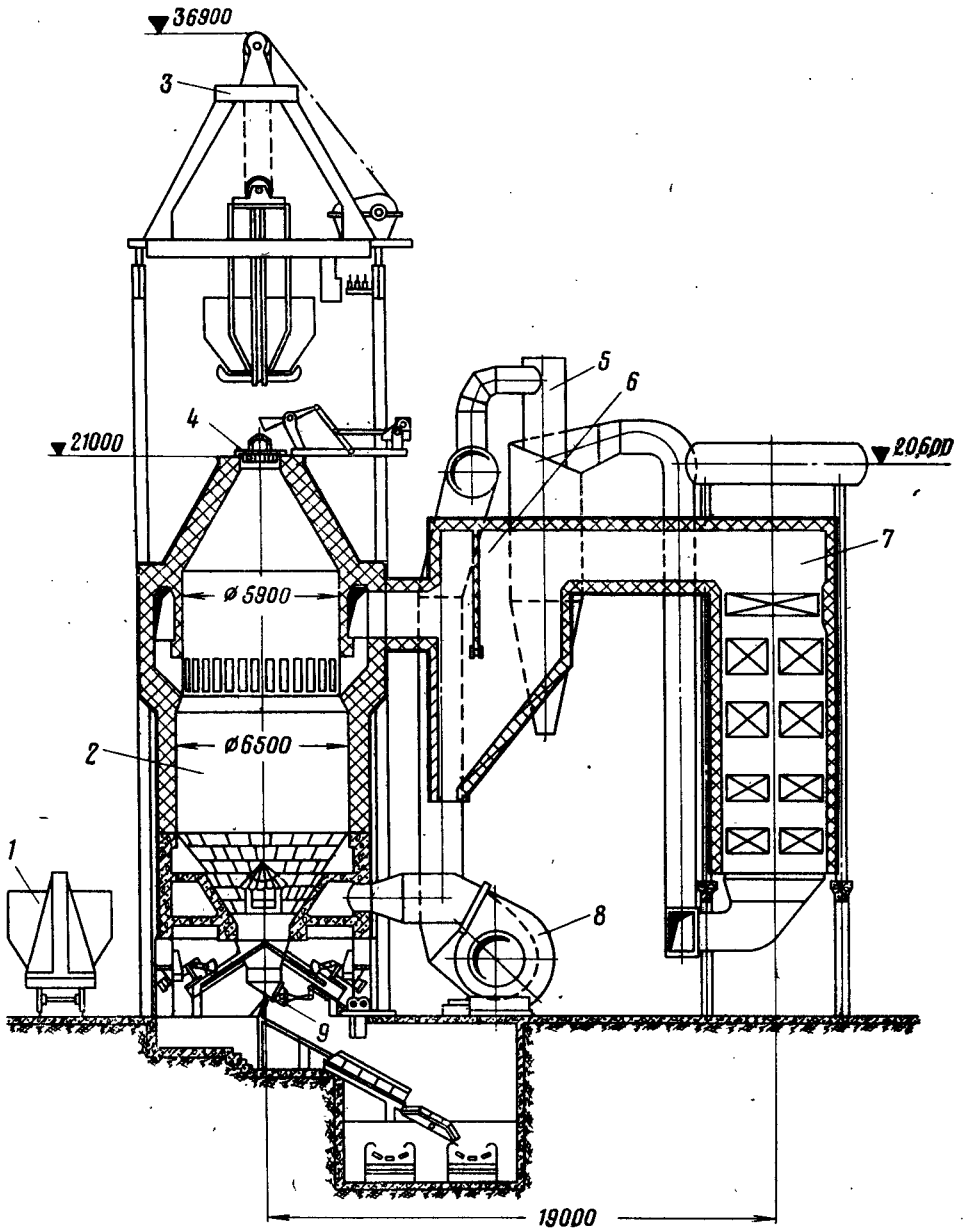


Рис. 11-9. Установка для сухого тушения кокса.

1 — вагон для кокса; *2* — тушильный цилиндрический бункер; *3* — подъемное устройство; *4* — загрузочный люк; *5* — циклоны; *6* — пылеотделитель; *7* — котел-утилизатор КСТ-80; *8* — дымосос; *9* — разгрузочный люк.

пературах (до 1 200 °С). В 1 $м^3$ сырого газа наряду с другими примесями содержится 80—125 $г$ смолы; в дальнейшем коксовый газ подвергается очистке, причем из него удаляются влага, смола, бензол, аммиак, цианистые соединения и сероводород.

Смола, кроме механической примеси аммиачной воды, содержит следующие продукты, % по массе:

Бензола и легкого масла (температура кипения $t_{кип}$ до 170 °С)	1,4—4,5
Среднего масла ($t_{кип}$=170÷230 °С)	3,5—21
Тяжелого масла ($t_{кип}$=200÷300 °С)	8—17
Антраценового масла ($t_{кип}$=300÷360° С)	10—32
Пека (остатка)	33—66

Все перечисленные выше продукты являются ценным сырьем для ряда химических производств, имеющих важное народнохозяйственное значение.

Состав кокса, газа и смолы зависит от природы угля и от режима коксования.

Принципиальная схема коксования и первичной обработки газа представлена на рис. 11-10. Установка состоит из коксовых печей, обслуживаемых вспомогательными механизмами (для загрузки шихты, ее передвижения, выталкивания, тушения кокса при выгрузке и пр.), и аппаратуры для охлаждения и очистки коксового газа, а также извлечения из него аммиака и бензола. Выделяющийся из шихты во время коксования газ собирается и подвергается ступенчатой промывке аммиачной водой для охлаждения его и частичного осаждения смолы. Далее газ освобождается от туманообразной смолы при помощи смолоотделителей. После этого из газа извлекается аммиак путем поглощения серной кислотой и получения сульфата аммония. Затем из газа извлекают бензол путем абсорбции его каменноугольным или соляровым маслом. После удаления бензола газ подвергается дополнительной очистке и направляется по газопроводу к дальним потребителям. Для уменьшения расхода коксового газа на обогрев печей его в настоящее время частично заменяют менее дефицитным доменным газом.

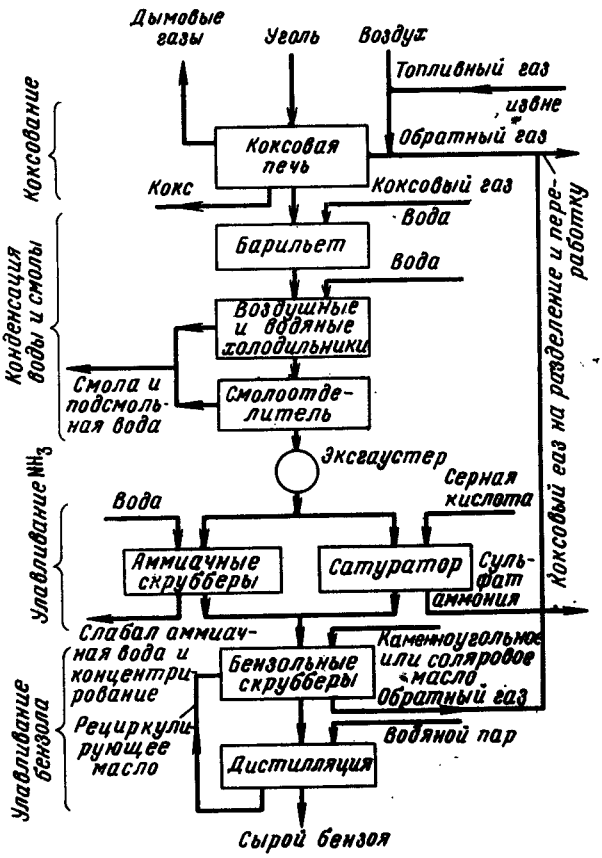


Рис. 11-10. Принципиальная схема коксования и первичной обработки газов.

11-4. ДОМЕННЫЙ ПРОЦЕСС И ПОЛУЧЕНИЕ ДОМЕННОГО ГАЗА

Доменные печи работают на каменноугольном коксе. Для улучшения работы печей и экономии кокса, который является дорогим топливом, в зону горения доменных печей вдувают при помощи сопл некоторое количество природного газа. В качестве добавочного топлива вместо природного газа также используют и мазут. В доменных печах совмещаются два различных процесса: металлургический процесс выплавки чугуна из железных руд и процесс газификации кокса. Эти процессы органически связаны друг с другом.

Доменная печь, схема процессов в которой показана на рис. 11-11, представляет собой шахту, имеющую значительные размеры. Так, даже небольшая печь с полезным объемом 1 400 *м*³ имеет высоту 33 *м* и внутренний диаметр горна 8,2 м. Исходная шихта состоит либо из железной руды в агломерированном виде, кокса и флюсов — известняка и мартеновского шлака, либо из уже офлюсованного агломерата. Шихтовые материалы загружаются в печь чередующимися слоями.

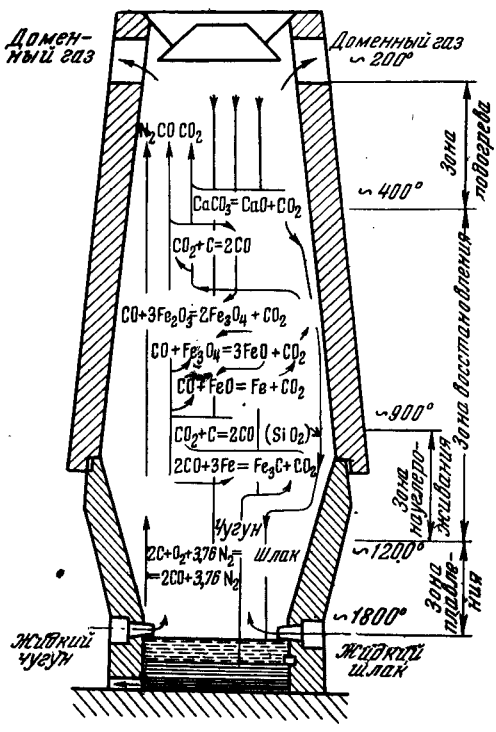


Рис. 11-11. Схема процессов, происходящих в доменной печи.

Железная руда состоит из смеси окислов железа. В магнитном железняке содержится главным образом магнитная окись железа Fe_3O_4, в красном железняке — окись железа Fe_2O_3 и в буром железняке — гидрат окиси железа $Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$. Содержание железа в рудах колеблется от 38 до 65%, причем наилучшей рудой является магнитный железняк.

Воздух, подогретый в воздухонагревателях до температуры 1 000—1 250 °С, подается в печь через фурмы и пронизывает слой кокса, состоящий из кусков размером в 25—80 *мм*. При выходе из сопла фурмы скорость воздуха достигает 100—150 *м/сек*, а затем по мере прохождения через слой кокса в направлении оси печи постепенно уменьшается. Чем выше температура подогрева воздушного дутья, тем лучше работает печь. Если раньше довольствовались температурой дутья 800—950 °С, то в настоящее время она доводится до 1 250 °С и выше за счет улучшения работы кауперов путем отопления их не одним доменным газом, а смешанным коксодоменным газом с теплотой сгорания 4,19—5,45 *Мдж/м*³. Для новых доменных печей Гипромезом разработана специальная конструкция регенеративных воздухоподогревателей.

Газообразование в слое кокса. Многочисленные опыты по газификации углерода, проведенные З. Ф. Чухановым, М. К. Гродзовским и др., показали, что в слое газифицируемого углерода имеются две характерные зоны — кислородная (зона горения) и восстановительная. Эти зоны связаны между собой, и переход от одной в другую происходит постепенно, без разрыва.

В кислородной зоне взаимодействие углерода с кислородом протекает по реакциям

$$C+O_2=CO_2+409{,}055\ Мдж; \qquad (11\text{-}1)$$

$$2C+O_2=2CO+246{,}564\ Мдж. \qquad (11\text{-}2)$$

Таким образом, продуктами реакции в кислородной зоне являются одновременно окись углерода CO и двуокись углерода CO_2. Образующиеся двуокись и окись углерода способны в дальнейшем реагировать с углеродом и кислородом, поэтому написанные реакции называются первичными. При горении углерода неизбежно протекают одновременно и следующие вторичные реакции:

а) горение окиси углерода за счет кислорода дутья

$$2CO+O_2\longrightarrow 2CO_2; \qquad (11\text{-}3)$$

б) восстановление двуокиси углерода в присутствии раскаленного углерода до окиси углерода

$$CO_2+C\longrightarrow 2CO. \qquad (11\text{-}4)$$

Таким образом, взаимодействие углерода с кислородом в зоне горения нельзя рассматривать как простую окислительную реакцию.

Взаимодействие углерода с кислородом и двуокисью углерода протекает на поверхности раздела фаз (такие реакции называются гетерогенными), и скорость его $w_{пов}$ измеряется количеством углерода в граммах, сгоревшего за 1 *сек* на 1 $см^2$ активной поверхности топлива, т. е. имеет размерность $г/(см^2 \cdot сек)$. Эта скорость зависит от температуры процесса и концентрации реагирующих газов, а также от скорости диффузии окислителя к поверхности топлива. Вблизи этой поверхности (в пограничном слое) концентрация реагирующих веществ уменьшается, а концентрация продуктов реакции (CO и CO_2) увеличивается. Этот пограничный слой представляет наибольшее сопротивление подводу окислителя, поэтому скорость реакции горения зависит в основном от скорости диффузии окислителя через пограничный слой. Последняя же зависит от толщины пограничного слоя, температуры и от разности концентраций окислителя в потоке и у поверхности. В свою очередь толщина пограничного слоя зависит от скорости потока и приведенного диаметра частиц топлива.

При имеющих место в доменной печи высоких температурах более 2 000 °C скорость реакции окисления так велика, что процесс горения углерода лимитируется практически только скоростью диффузии, т. е. физическим фактором. Восстановление двуокиси углерода заканчивается на расстоянии примерно 1—1,5 *м* от фурм.

Высокая температура и большая скорость газового потока обеспечивают интенсивный процесс газификации, и весовое напряжение горна по коксу составляет 1 000 $кг/(м^2 \cdot ч)$ и более. Полученный воздушный генераторный газ с высокой температурой поднимается вверх, пронизывая куски шихтовых материалов, медленно опускающиеся вниз навстречу потоку газа, и, отдавая тепло шихте, обеспечивает протекание в печи всех эндотермических реакций.

Как видно из рис. 11-10, в верхней части печи по мере нагрева материалов идет удаление внешней и внутренней (гидратной) влаги из шихты, которое заканчивается при температуре порядка 800 °C.

Здесь же из кокса выделяются летучие вещества, главным образом водород. При температуре 600 °C и выше происходит разложение известняка $CaCO_3\longrightarrow CaO+CO_2$, протекающее с поглощением тепла. Выделяющаяся при этом двуокись углерода смешивается с потоком газа, увеличивая его балласт.

В области относительно невысоких температур (от 400 до 950 °С) происходит косвенное восстановление железа из руды. Для восстановления расходуется окись углерода, проходящая через слой шихты. Процесс восстановления железа окисью углерода может быть выражен суммарным уравнением

$$Fe_2O_3+3CO=2Fe+3CO_2+77{,}036\ Мдж. \qquad (11\text{-}5)$$

Из приведенных уравнений видно, что при косвенном восстановлении расходуется некоторая часть окиси углерода, содержащейся в газе, а взамен нее в поток газа включается двуокись углерода. Реакции протекают в конечном счете с выделением тепла.

В области высоких температур (выше 950 °С) идет процесс прямого восстановления

$$FeO+C=Fe+CO-144{,}352\ Мдж, \qquad (11\text{-}6)$$

т. е. в процессе прямого восстановления углерод окисляется за счет кислорода закиси железа FeO, а получающаяся окись углерода присоединяется к газовому потоку. Процесс идет с поглощением тепла. Прямым путем восстанавливается в железо примерно половина закиси железа, но косвенное восстановление более выгодно, и поэтому зону умеренных температур целесообразно увеличивать.

Некоторая часть железа восстанавливается также водородом, который получается от разложения как водяных паров, поступающих с воздухом, так и влаги сырых материалов, достигших зоны высоких температур. Разложение идет по реакции

$$C+H_2O=CO+H_2. \qquad (11\text{-}7)$$

Процесс восстановления железа водородом идет по реакции

$$Fe_2O_3+3H_2=2Fe+3H_2O-295{,}073\ Мдж. \qquad (11\text{-}8)$$

В последнее время дутье искусственно увлажняется и влажность его автоматически регулируется, что устраняет вредные колебания естественной влажности воздуха и увеличивает восстановительную способность газов, так как реакция (11-7) увеличивает в газах содержание CO и H_2 и обогащает дутье кислородом, содержащимся в водяных парах. В результате производительность доменной печи увеличивается. Каждые 10 *г* влаги на 1 $м^3$ дутья увеличивают скорость плавки на 3—3,6% и снижает удельный расход кокса на 1,4%.

Восстаиовленное железо в печи науглероживается, т. е. сплавляется с углеродом, причем имеет место частичное образование карбида железа по уравнению

$$3Fe+2CO=Fe_3C+CO_2. \qquad (11\text{-}9)$$

Сплав железа с углеродом, называемый чугуном, стекает вниз, в горн, откуда через летку выдается для дальнейшего передела.

Выходящий через верхнюю часть печи (колошник) доменный газ имеет теплоту сгорания $Q_н^c=3{,}3\div4{,}0$ *Мдж/м*^{3}. Этот газ не содержит смолы, но загрязнен пылью. Состав его зависит от качества кокса и агломерата железной руды и флюсов, режима плавки, давления газа на выходе, температуры нагрева дутья, степени обогащения дутья влагой и кислородом. Средний состав сухого газа в объемных процентах для печей, выпускающих передельный чугун на каменноугольном коксе при использовании офлюсованного агломерата, следующий: CO=26,5%; CH_4=0,1%, H_2=1,8%; CO_2=13,7%; N_2=57,7%. Этому составу соответствует низшая теплота сгорания $Q_н^c=3{,}6$ *Мдж/м*^{3}.

Удельный выход доменного газа определяется по материальному балансу углерода на 1 *т* чугуна:

$$v_г = \frac{c_к + c_ф - c_ч - c_п}{\frac{CO_2 + CO + CH_4}{100} \cdot \frac{12}{22,4}}, \; м^3/т; \qquad (11\text{-}10)$$

здесь $c_к$, $c_ф$, $c_ч$ и $c_п$ — количество углерода, *кг*, на 1 *т* чугуна соответственно в коксе, флюсах, чугуне и пыли; CO_2, CO и CH_4 — содержание в газе двуокиси углерода, окиси углерода и метана, % по объему.

Пример 11-1. Определить выход доменного газа по следующим данным: $CO = 26,5\%$; $CH_4 = 0,1\%$; $CO_2 = 13,7\%$. Содержание углерода в коксе 85%. Удельный расход кокса $b = 0,712$ *т* кокса на 1 *т* чугуна. Количество углерода в чугуне $c_ч = 40$ *кг/т* чугуна, количество углерода в пыли, выносимой из печи, $c_п = 2,40$ *кг/т* чугуна.

Количество углерода в коксе составляет:

$$c_к = 0,712 \cdot 850 = 605 \text{ кг на 1 т чугуна.}$$

Удельный выход сухого доменного газа определяем по формуле (11-10), пренебрегая углеродом флюсов:

$$v_г = \frac{605 - 40 - 2,53}{\frac{13,7 + 26,5 + 0,1}{100} \cdot \frac{12}{22,4}} = 2\,600 \text{ м}^3 \text{ на 1 т чугуна.}$$

Удельный выход доменного газа в зависимости от условий (от размера печей, качества шихты и режима работы) составляет от 2 500 до 4 000 $м^3$ на 1 *т* чугуна, и в газ переходит до 50—58% химически связанного тепла кокса.

Удельный расход кокса в доменных печах колеблется от 0,55 до 0,75 *т* кокса на 1 *т* чугуна. Работа доменных печей характеризуется интенсивностью плавки, под которой понимается количество израсходованного кокса за сутки в 1 $м^3$ объема печи. Эта величина изменяется примерно от 1,55 до 1,25 *т* кокса на 1 $м^3$ объема печи.

Для характеристики работы доменной печи пользуются также коэффициентом использования объема ε, показывающим, в каком объеме выплавляется за сутки 1 *т* чугуна. Этот коэффициент изменяется примерно от 0,50 до 0,70 $м^3$ в сутки на 1 *т* чугуна. Чем меньше этот коэффициент, тем лучше используется объем печи.

Абсолютная выработка газа очень велика. Например, в доменной печи со средним объемом рабочего пространства около 1 700 $м^3$ вырабатывается доменный газ (с теплотой сгорания $Q_н^с = 3\,610$ *кдж/м*^{3}) в количестве

$$V = \frac{1\,090 \cdot 10^6}{3\,610} = 300 \cdot 10^3, \; м^3/ч.$$

С целью интенсификации работы доменных печей они в настоящее время переведены на повышенное давление: на колошнике вместо 10—15 *кн/м*^{2}, как было ранее, давление доведено до 250 *кн/м*^{2}, а в некоторых печах и более. При повышенном давлении согласно закону действующих масс увеличивается скорость теплообменных и массообменных процессов в печи, газы более равномерно распределяются по сечению и, следовательно, увеличивается производительность печи.

Доменный газ, получаемый в печах, работающих под давлением, обладает большой энергией, которую целесообразно использовать в газовых турбинах, применяя его в качестве рабочего тела. Если пропускать через газовую турбину газ от печи, для которой мощность воздуходувки составляет 20 000 *квт*, то, используя перепад давления от 250 *кн/м*^{2} до 9,81 *кн/м*^{2} при подогреве газа до 500 °С, газовая турбина-

расширитель разовьет мощность 13 500 *квт* и вернет 68% мощности, затраченной на сжатие доменного дутья.

Очистка доменного газа. При выходе из колошника доменный газ содержит много пыли, от 10 до 60 *г* на 1 *м*³ газа. Запыленность газа зависит от пылеватости и состава руды, количества агломерата, интенсивности хода печи и других факторов. Первая цифра относится к работе современных печей на агломерате хорошего качества, вторая — к работе без применения агломерата на пылеватой железной руде.

Большая запыленность требует глубокой очистки, так как иначе работа устройств, в которых сжигается газ (коксовые печи, воздухонагреватели доменных печей, мартеновские печи, топки паровых котлов), будет весьма трудной из-за быстрого засорения отдельных элементов этих устройств и неэкономичной вследствие малой длительности кампании. При нормальной работе содержание пыли не должно превышать 3—6 *мг/м*³.

Одна из схем очистки доменного газа изображена на рис. 11-12. Запыленный газ из колошника доменной печи проходит сначала грубую очистку в сухом инерционном пылеотделителе и циклоне. Содержание пыли после грубой очистки составляет 3—12 *г* на 1 *м*³ газа. Затем газ поступает в скруббер и далее в дезинтегратор и, наконец, в водоотделитель. В газоочистках блочного типа перечисленные аппараты включаются последовательно после коллектора грязного газа. В схеме газоочистки блочного типа перечисленные аппараты включаются последовательно после коллектора грязного газа. В схеме газоочистки с общим коллектором газа (как показано на рис. 11-12) число аппаратов каждого типа может быть различным.

В настоящее время в СССР тонкая очистка доменного газа осуществляется, как правило, в электрофильтрах. Принцип действия электрофильтра заключается в том, что молекулы газа ионизируются, а затем передают заряд взвешенным в газе частицам, вследствие чего последние перемещаются в электрическом поле к осадительным электродам. Работа электрофильтра возможна только при питании его постоянным током, для чего необходимо наличие специального выпрямительного устройства для преобразования переменного тока в постоянный. Основным условием создания коронного разряда является наличие значительной разницы в поверхностях электродов.

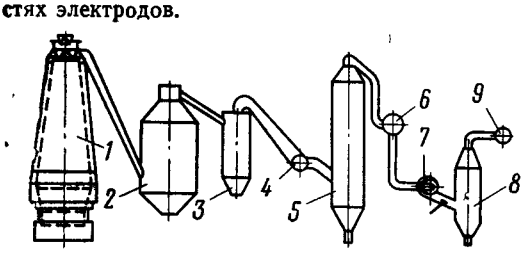


Рис. 11-12. Схема очистки доменного газа от пыли.

1 — доменная печь; *2* — инерционный пылеотделитель; *3* — циклон; *4* — коллектор грязного газа, *5* — скруббер; *6* — коллектор получистого газа; *7* — дезинтегратор; *8* — водоотделитель; *9* — коллектор чистого газа.

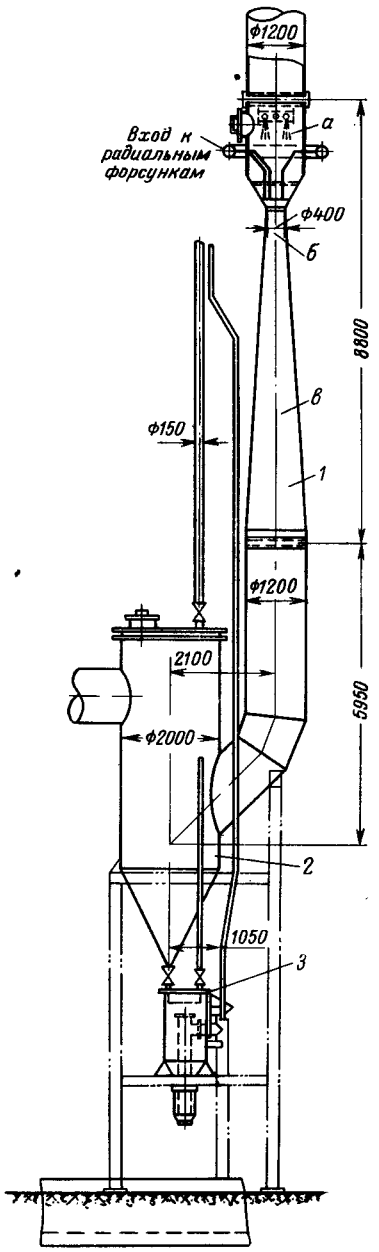


Рис. 11-13. Установка трубы Вентури.

1 — труба-расширитель; *2* — водоотделитель; *3* — водоотводчик повышенного давления; *а* — подвод газа; *б* — горловина трубы; *в* — диффузор.

Стоимость очистки газа в электрофильтрах примерно в 1,5 раза меньше стоимости очистки его в дезинтеграторах. Расход электроэнергии на очистку газа электрофильтрами на 1 000 $м^3$ составляет 0,5—0,8 *квт·ч*, в то время как при дезинтеграторах он составляет 5—6 *квт·ч*.

Схема газоочистки с дезинтегратором, изображенная на рис. 11-12, характерна для доменных печей, работающих с небольшим давлением на колошнике 10—15 $кн/м^2$. Если доменные печи работают с давлением 80—120 $кн/м^2$ и более, имеется возможность рационализировать такую схему путем замены дезинтегратора трубой-расширителем Вентури. Схема трубы Вентури показана на рис. 11-13. Запыленный газ вводится в смесительную камеру, куда подается также вода. В силу большей скорости газа вода быстро распыливается на очень мелкие капли, образуя туман, и хорошо перемешивается

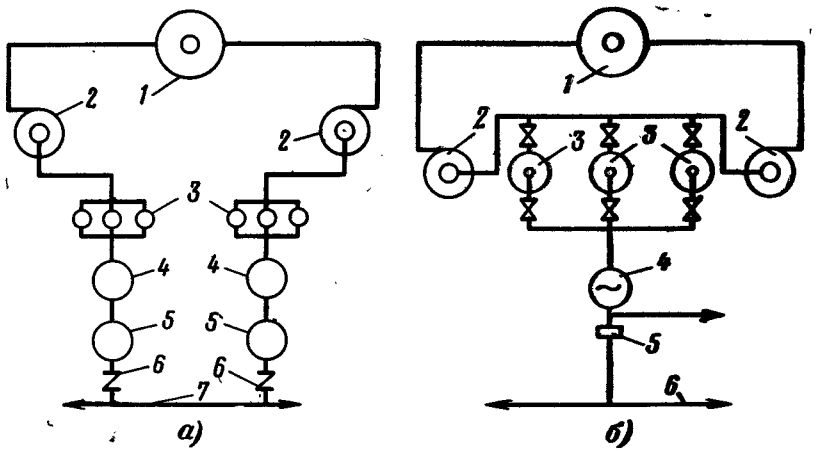


Рис. 11-14. Улучшенные схемы газоочистки.

а — схема электроочистки: *1* — доменная печь; *2* — циклон; *3* — труба Вентури; *4* — скруббер; *5* — электрофильтр; *6* — дроссель; *7* — коллектор чистого газа; *б* — схема сухой очистки: *1* — печь; *2* — циклон; *3* — сухой рукавный фильтр тонкой очистки; *4* — турбина-расширитель; *5* — охладитель газа; *6* — коллектор чистого газа.

с газом. Наибольшую скорость (50—150 *м/сек*) газ имеет в горловине, а затем газ расширяется в диффузоре. Благодаря тесному контакту водяных частиц с газом происходит смачивание пыли и укрупнение ее частиц. Для удаления укрупненной пыли после трубы Вентури ставится циклонный влагоотделитель или скруббер. При очистке газа до конечного содержания пыли 6 $мг/м^3$ имеет место потеря напора в трубе в 1 500—2 000 $дан/м^2$, что допустимо для доменных печей, работающих с давлением газа на колошнике 30—40 $кн/м^2$, при этом расход воды составляет 1—2 $л/м^3$.

Если трубу Вентури поставить перед электрофильтром, то производительность последнего увеличивается в 1,5—2 раза и примерно в 2 раза уменьшается содержание пыли в очищенном газе. Потеря давления в этом случае составляет 500—600 $дан/м^2$.

На рис. 11-14 показаны более совершенные системы газоочистки. Схема *а* предусматривает электрическую очистку газов с применением труб Вентури. В этом случае аппаратура располагается в следующей последовательности: доменная печь — циклон — труба Вентури — скруббер — электрофильтр — дроссель для редуцирования газа — общая сеть. В этой схеме не предусмотрена установка газовых турбин.

По схеме *б* осуществляется сухая очистка газа с установкой аппаратуры в такой последовательности: доменная печь — циклон — сухой фильтр тонкой очистки (рукавный матерчатый фильтр) — газовая турбина — охладитель газа — общая сеть. Рукавные сухие фильтры, через которые проходит запыленный газ, изготовляются из специальной теплостойкой пряжи. При работе они периодически встряхиваются; такие фильтры хорошо улавливают пыль (до 99%) и мало зависят от дисперсности пыли. Их преимущество заключается в том, что они позволяют осуществлять тонкую очистку доменного газа, имеющего температуру 300—350 °С, что дает возможность использовать его энергию газовой турбине. В случае установки газовых турбин взамен дросселей при мокрой электростатической очистке (типичная газоочистка на заводах СССР) доменный газ, который после газоочистки имеет невысокую температуру (40—50 °С), необходимо предварительно нагревать до температуры 300—350 °С.

11-5. СХЕМЫ ГАЗОВОГО ХОЗЯЙСТВА ЗАВОДОВ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ. РОЛЬ ДОМЕННОГО И КОКСОВОГО ГАЗОВ В ГАЗОВОМ БАЛАНСЕ СССР

Доменный газ имеет, как было указано выше, малую теплоту сгорания ($Q^c_н = 3{,}35$ до 4,19 $Мдж/м^3$), и в нем содержится много балласта (со-

держание CO_2+N_2 доходит до 70—73%); поэтому его невыгодно транспортировать на большое расстояние. Как правило, доменный газ используется на том же металлургическом комбинате, на котором он получается.

Коксовый газ является сравнительно высококалорийным газом (низшая теплота сгорания $Q_н^c = 15{,}1 \div 18{,}85$ *Мдж/м*³), он содержит относительно немного балласта ($CO_2+N_2=6—10\%$), поэтому его можно транспортировать и на большие расстояния. Однако металлургические комбинаты сами нуждаются в высококалорийном топливе, и поэтому коксовый газ в настоящее время потребляется в основном на месте. Коксовый газ является ценным сырьем для получения полиэтилена, а также сырьем для азотнотуковых заводов, и некоторая часть его используется в качестве химического сырья. Для синтеза аммиака NH_3 требуется смесь газов, состоящая из 75% водорода и 25% азота. Содержание водорода в коксовом газе достигает 55—60%, поэтому коксовый газ очень подходит для производства аммиака, и на некоторых коксохимических заводах сооружены и действуют азотнотуковые предприятия, использующие коксовый газ. Водород из коксового газа отделяют способом глубокого охлаждения, при котором отдельные компоненты газа, имеющие разную температуру перехода в жидкую фазу, переводят в жидкое состояние и отделяют от водорода, имеющего наиболее низкую температуру сжижения. Из разделительной аппаратуры получают водородно-азотную смесь, этилен, метан и смесь окиси углерода с азотом. Этилен идет на производство полиэтилена, а метан и смесь $CO+N_2$ возвращаются на металлургические заводы для использования в качестве топлива в печах. При переработке коксового газа из него отбирается около 40% тепла. Коксовый газ может быть переработан и методом конверсии метана и окиси углерода по реакциям

$$\left.\begin{aligned} CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2 - q_1; \\ CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 + q_2. \end{aligned}\right\} \qquad (11\text{-}11)$$

Недостатком этого способа переработки коксового газа является невозможность использования входящих в его состав этилена, бутилена и других углеводородов. В настоящее время доменный и коксовый газы распределяются между основными цехами металлургических комбинатов примерно следующим образом:

	Доменный газ, %	Коксовый газ, %
Коксохимнческий цех	25—35	4—10
Доменный цех	25—35	—
Мартеновский цех	10—15	50—60
Прокатные цехи	15—20	25—30
Аглофабрика н вспомогательные цехи	3—5	7—10
Энергетнческие цехи (ТЭЦ и др.)	10—15	2—5
Потерн	5—10	1—2

Доменный газ расходуется в первую очередь на нагрев воздушного дутья самих же доменных печей (при повышенном нагреве дутья для этой цели используется до 30—40% всего доменного газа); кроме того, он сжигается в нагревательных и других печах завода и под паровыми котлами ТЭЦ. Большое содержание балласта не дает возможности достигать такой температуры в печах, при которой теплообмен протекает достаточно интенсивно, и поэтому отопление печей одним доменным газом стало нецелесообразным из-за невысоких технико-экономических показателей работы печей.

По этой причине на ММК отказались от отопления коксовых печей доменным газом и перешли на отопление их смешанным коксодомен-

ным газом с теплотой сгорания 4,19—5,03 *Мдж/м*³. Кауперы домеиных печей ММК отапливаются также коксодомениым газом с той же теплотой сгорания, а мартеновские печи, в которых для обеспечения интенсивной плавки необходимо достижение высоких температур, работают на высококалорийном топливе — попутном газе или коксовом газе с добавкой мазута. Нагревательные прокатные печи ММК работают на природном и смешанном коксодоменном газе с теплотой сгорания 4,19—10,5 *Мдж/м*³.

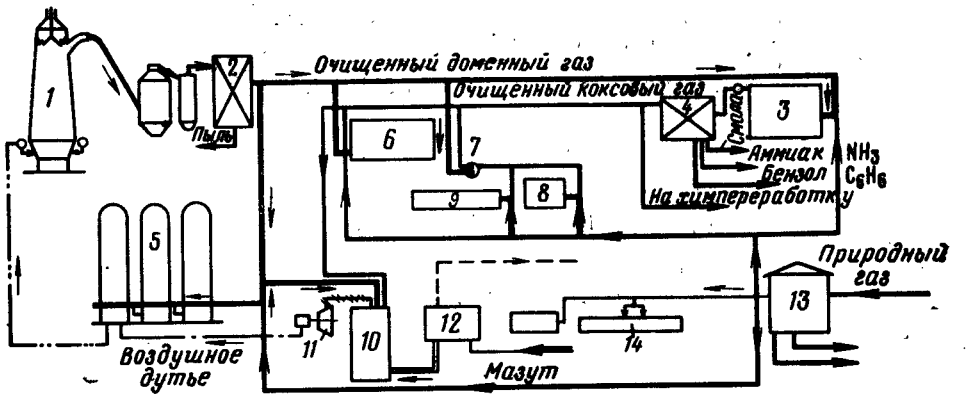


Рис. 11-15. Схема газового хозяйства металлургического завода с полным циклом.

1 — доменные печи; *2* — газоочистка доменного газа; *3* — коксовые печи; *4* — газоочистка коксового газа; *5* — воздухонагреватели доменных печей (кауперы); *6* — мартеновские печи; *7* — газосмесительная станция; *8* — нагревательные колодцы прокатного цеха; *9* — методические нагревательные и термические печи; *10* — паровые котлы ТЭЦ: *11* — турбовоздуходувки; *12* — мазутное хозяйство; *13* — заводская ГРС; *14* — туннельные и другие печи для обжига огнеупоров.

Снабжение металлургических заводов высококалорийным топливом со стороны далеко не всегда осуществимо, поэтому еще многие мартеновские печи работают на коксодоменном газе с теплотой сгорания около 9,23 *Мдж/м*³. При подогреве воздуха до 1 200 °С и газа до 1 000 °С в печах создаются высокие температуры, достаточные для выплавки стали. Недостаток коксового и доменного газа на металлургических заводах может покрываться природным газом и мазутом или выработкой полукоксового газа. Примеры газового хозяйства заводов с полным циклом показаны на рис. 11-15 и 11-16.

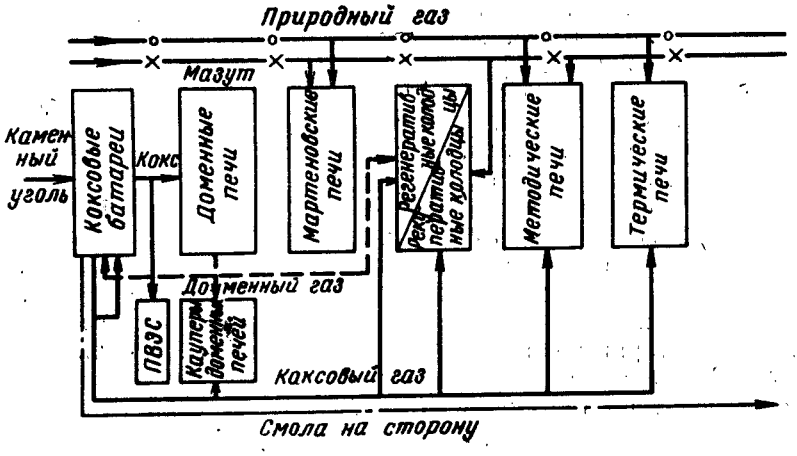


Рис. 11-16. Схема газового хозяйства Магнитогорского металлургического комбината (ММК).

Применимы и другие схемы газоснабжения, определяемые технико-экономическими соображениями и возможностями снабжения топливом металлургических заводов данного района.

В связи с быстрым ростом добычи природного газа доля искусственных горючих газов в газовом балансе СССР непрерывно снижается. В 1957 г. теплота доменного газа составляла около 67% от теплоты природного газа, а в 1973 г. — около 18%.

Пример 11-2. Определить примерную долю доменного, коксового и природного газов в газовом балансе Советского Союза в 1975 г., если производство чугуна составит $110 \cdot 10^6$ *т*, стали $150 \cdot 10^6$, а добыча природного газа $320 \cdot 10^9$ *м*^{3}.

Выход сухого доменного газа $v^c_д$ на 1 *т* передельного чугуна составляет от 2 000 до 3 000 *м*^{3}/*т*, в среднем возьмем 2 500 *м*^{3}/*т*. Теплота сгорания сухого доменного газа $Q^c_н$ — от 3,44 до 4,02 *Мдж*/*м*^{3}, или в среднем 3,73 *Мдж*/*м*^{3}.

Годовое производство доменного газа составляет:

$$110 \cdot 10^6 \cdot 2\,500 = 275 \cdot 10^9 \ м^3/год.$$

Теплота доменного газа составляет:

$$Q_{д.г} = 275 \cdot 10^9 \cdot 3{,}73 = 1{,}025 \cdot 10^{12} \ Мдж/год.$$

Теплота природного газа, приннмая $Q^c_н = 35{,}6$ *Мдж*/*м*^{3}, составляет:

$$320 \cdot 10^9 \cdot 35{,}6 = 11{,}4 \cdot 10^{12} \ Мдж/год.$$

Следовательно, теплота доменного газа составляет:

$\frac{1{,}025}{11{,}4} \cdot 100 = 9\%$ от теплоты природного газа.

Аналогично можно подсчитать, что теплота коксового газа составляет от 46 до 57% от теплоты доменного газа, или в среднем около 50%. Следовательно, суммарная доля доменного и коксового газов в газовом балансе составляет около 13,5%.

Доля генераторного газа в общем газовом балансе СССР невелика и непрерывно снижается в связи с развитием промышленности природного газа, а также из-за дороговизны производства генераторного газа. Этот последний имеет подсобное значение или применяется в районах, в которые еще не подведен природный газ.

11-6. ГАЗИФИКАЦИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Природный газ — дешевое и весьма эффективное топливо, но не всюду пока в настоящее время он имеется, и поэтому иногда для получения горючего газа прибегают к газификации твердого топлива. Этот процесс состоит в том, что горючая часть топлива при воздействии воздуха, водяных паров, кислорода или двуокиси углерода практически полностью превращается в газообразное топливо. Остаток содержит лишь негорючую часть топлива — золу или шлак. Этим газификация принципиально отличается от описанных ранее процессов сухой перегонки топлива, в которых получается твердый горючий остаток — полукокс или кокс. При газификации некоторых топлив можно помимо газообразных продуктов получить и жидкие продукты (смолу, кислоты и др.) путем конденсации их при охлаждении газа.

Аппараты, служащие для безостаточной газификации, называют *газогенераторами,* а установки, оборудованные ими, — *газогенераторными станциями.* Помимо газогенераторов, последние имеют устройство для охлаждения и очистки генераторного газа, для его компрессии и транспорта и других вспомогательных технологических операций. Газогенератор, конструктивная схема которого изображена на рис. 11-17, представляет собой цилиндрическую шахту.

Недостатком процесса газификации является относительная сложность газогенераторных установок и высокая стоимость эксплуатации их, чем обусловливается относительно высокая себестоимость газа.

В газогенераторе протекают связанные между собой процессы сушки и сухой перегонки топлива, взаимодействия газов дутья (кислорода, водяного пара, двуокиси углерода) с углеродом кокса и взаимодействия продуктов газообразования между собой. На эти процессы оказывают

сильное влияние как природные свойства топлива и образовавшегося кокса, так и процессы теплообмена, диффузии и аэродинамики потока. В зависимости от состава топлива и дутья, а также от организации процесса газификации генераторные газы делятся на *воздушный, водяной, смешанный (паровоздушный), парокислородный* и *регенеративный.* Наибольшее распространение получил смешанный генераторный газ.

При рассмотрении газогенераторного процесса весь слой топлива условно делят на две части: 1) верхнюю, где протекают подготовительные процессы сушки топлива и сухой перегонки; 2) нижнюю, в которой осуществляется газификация углеродистого остатка — кокса. В действительности во вторую часть может опускаться топливо, в котором подготовительные процессы еще полностью не завершены.

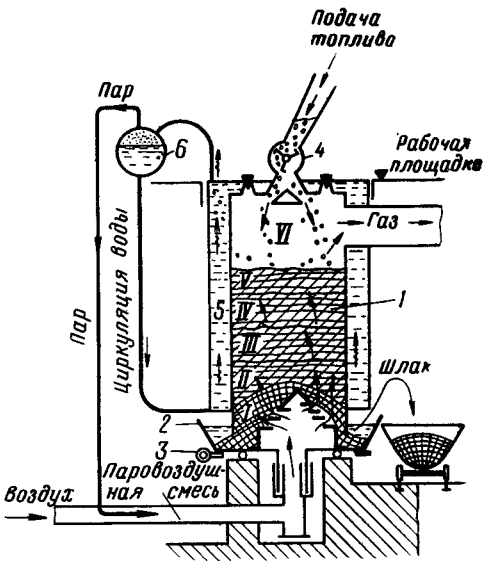


Рис. 11-17. Принципиальная схема газогенератора.
1 — шахта; *2* — вращающаяся чаша с укрепленной на ней колосниковой решеткой; *3* — привод чаши; *4* — питатель для топлива; *5* — пароводяная рубашка; *6* — котел (барабан-сепаратор).

Теоретические и действительные газогенераторные процессы. Рассмотрение теоретических газогенераторных процессов позволяет лучше представить себе действительные процессы, хотя последние всегда отличаются от теоретических. При рассмотрении теоретических процессов предполагается, что топливом является чистый углерод, потери тепла отсутствуют, а химические реакции полностью завершаются.

Воздушный газ. Теоретический воздушный газ мог бы быть получен при взаимодействии чистого углерода с воздухом, содержащим 21% кислорода и 79% азота (по объему).

Полный процесс газообразования записывается уравнением

$$2C+O_2+3{,}76N_2=2CO+3{,}76N_2+247\ Мдж, \qquad (11\text{-}12)$$

где $3{,}76=79/21$, а $247=123{,}5\cdot 2$ — тепловой эффект данной реакции.

В результате этой реакции получается газ, содержащий окись углерода в количестве

$$CO=\frac{2}{2+3{,}76}100=34{,}7\%.$$

Газ будет горячим, так как при его образовании выделяется тепло в количестве

$$\frac{247}{(2+3{,}76)\,22{,}4}=1{,}9\ Мдж \text{ на } 1\ м^3 \text{ газа.}$$

где 22,4 $м^3$ — объем 1 киломоля идеального газа при нормальных условиях (0 °С и 760 *мм рт. ст.*).

Так как атомная масса углерода равна 12, то выход воздушного газа из 1 *кг* углерода составляет:

$$v=22{,}4\frac{2+3{,}76}{2\cdot 12}=5{,}38\ м^3/кг.$$

Теплота сгорания газа по формуле (9-5) составляет:

$$Q^р_н=0{,}12628\cdot 34{,}7=4{,}37\ Мдж/м^3.$$

Так как на 1 *кмоль* углерода получается 1 *кмоль* CO, то к. п. д. газификации, представляющий собой отношение теплоты сгорания полученного газа к теплоте затраченного топлива, равен:

$$\eta = \frac{4{,}37 \cdot 5{,}38}{34{,}2} 100 = 70\%.$$

В действительности воздушный газ может быть получен при продувке воздухом раскаленного каменноугольного кокса, причем процесс отклоняется от идеального главным образом вследствие неполного восстановления CO_2, прорыва воздуха у стенок генератора и содержания в коксе, кроме углерода, небольшого количества летучих веществ; поэтому действительный состав газа отличается от теоретического, а теплота сгорания оказывается ниже, чем подсчитанная выше.

При газификации топлива со значительным содержанием летучих веществ состав газа еще больше отличается от идеального, правда,

Таблица 11-2

Характеристика зон газогенератора (соответственно рис. 11-17)

Зона	Название зоны	Назначение зоны и протекающие в ней процессы	Термохимические реакции
I	Зоиа шлака (шлаковая подушка)	Поддержаиие слоя топлива, распределеиие паровоздушиой смеси, предохраиеиие чугунной колосниковой решетки от воздействия высоких температур, подогрев паровоздушной смеси аа счет тепла шлака	Практически отсутствуют
II	**Зоиа горения (кислородная зона)**	Окисление углерода в двуокись и окись углерода с выделением тепла	$C + O_2 + 3{,}76N_2 = CO_2 + 3{,}76N_2$; $2C + O_2 + 3{,}76N_2 = 2CO + 3{,}76N_2$
III	Зоиа восстаиовлеиия (зоиа газификации)	Восстаиовлеиие двуокиси углерода в окись углерода; разложеиие пара (окислеиие углерода); подогрев топлива за счет теплообмена с газом	$CO_2 + C = 2CO$; $H_2O + C = CO + H_2$; $2H_2O + C = CO_2 + 2H_2$
IV	Зоиа сухой перегонки	Пирогенетическое разложеиие топлива за счет теплообмеиа с газом; выделяются продукты: а) пирогеиетическая влага б) уксусиая кислота, метиловый спирт, формальдегид — при сухой перегонке древесины и торфа; фенолы в) смолы г) газы — окись углерода и двуокись углерода (за счет кислорода топлива и соответствующей части углерода), сероводород, метаи, этилеи, аммиак, азот и водород	
V	Зоиа подсушки	Удалеиие виешией влаги из топлива за счет физического тепла газа	
VI	Свободиое пространство	Выполияет роль коллектора	Иногда протекают иекоторые реакции частичио изменяющие состав газа, иапример $CO + 3H_2 = CH_4 + H_2O$ и др.

в лучшую сторону, так как теплота сгорания его повышается за счет содержания углеводородов (CH_4 и C_mH_n). Однако даже и в этих случаях воздушный газ имеет небольшую теплоту сгорания. Иногда воздушный газ получают из кокса и антрацита в газогенераторах с периодическим выпуском шлаков в жидком состоянии. Для повышения температуры в зоне горения до величины, необходимой для расплавления шлака, поступающий в генератор воздух сильно подогревают (до 500—600 °С), а для понижения температуры плавления шлака и уменьшения их вязкости добавляют флюсы.

Получение смешанного газа. По характеру протекающих процессов весь объем газогенератора можно разделить на зоны, располагающиеся одна за другой по высоте шахты, как было показано на рис. 11-18. Каждая зона имеет свое назначение в общем процессе генерации газа. Характеристика отдельных зон приведена в табл. 11-2.

Ход процесса газификации определяется свойствами топлива, скоростью дутья (скоростью газового потока) и степенью равномерности распределения газового потока по сечению газогенератора. Равномерность подачи паровоздушной смеси и распределения газового потока по сечению в основном зависят от конструкции газогенератора и от качества его обслуживания. Для зоны горения наибольшее значение имеют скорость газового потока и концентрация в нем газифицирующегося реагента. В зоне восстановления большое значение имеет температура. Температурный режим в шахте газогенератора зависит в сильной степени от скорости газа и от концентрации в нем кислорода и водяного пара и, следовательно, эти факторы в значительной мере определяют и ход реакции в восстановительной зоне. Кроме того, работа газогенератора зависит и от реакционной способности топлива, размеров его кусков, содержания в нем влаги и золы, от состава золы и от поведения топлива при его нагревании.

Состав смешанного генераторного газа зависит от свойств топлива, способа газификации, конструкции генератора и условий его обслуживания.

Классификация газогенераторов. Газогенераторы классифицируются: по роду процесса — газогенераторы для получения воздушного газа, водяного газа, смешанного газа; по характеру слоя — газогенераторы с плотным слоем, со взвешенным слоем, с «кипящим» слоем; по давлению, при котором протекает газогенераторный процесс, — атмосферные газогенераторы, газогенераторы высокого давления; по степени механизации процесса — немеханизированные газогенераторы, полумеханизированные и механизированные.

Взвешенный слой топлива организуется в газогенераторах, предназначениях для газификации мелкозернистого топлива. Такой слой располагается в конической части газогенератора, причем крупные частицы должны витать в узкой части конуса, а мелкие — в широкой. Таким образом, частицы сепарируются в слое. В действительности наблюдается поступательно-возвратное движение частиц, т. е. происходит некоторое перемешивание слоя.

«Кипящий» слой применяется для получения больших количеств технологического или энергетического генераторного газа из мелкозернистых бурых и других углей. Как уже говорилось выше, он возникает при скоростях потока, выходящих за пределы устойчивости плотного слоя. «Кипение» связано с раздвижкой частиц топлива, что увеличивает объем слоя в 1,5—3,0 раза. Вращательно-пульсирующее движение частиц топлива (обычно мелких — от 2 до 12 *мм*) напоминает движение кипящей жидкости, почему такой слой и получил название «кипящего».

Газогенераторы с *плотным слоем* используются для газификации крупнокускового топлива. Эти аппараты характерны широким приме-

нением частичной или полной механизации производственных процессов. Частичная механизация имеет место в полумеханизированных генераторах. Здесь за счет установки вращающейся колосниковой решетки осуществляется равномерное и непрерывное удаление шлаков без нарушения процесса газообразования. Механизация удаления шлака не только облегчает труд, но и в 1,5—2 раза повышает удельную производительность и общую тепловую мощность газогенераторов по сравнению с немеханизированными аппаратами. Газогенераторы большой мощности требуют механизации и остальных трудоемких процессов — загрузки, шуровки, разрыхления и выравнивания верхнего слоя топлива. Конструкции частично и полностью механизированных генераторов приведены в [Л. 1].

Технологические схемы газогенераторных установок. Простейшая технологическая схема газогенераториой установки представлена на рис. 11-18. В ней осуществляются получеиие горячего генераторного газа и сухая очистка газа в пылеуловителях от уиоса и пыли, что обусловливает небольшую начальную стоимость строительства и меньший расход материалов для изготовления оборудования. В тепловом отношеиии горячий газ выгоднее холодного, так как при потреблении его имеется возможность использовать физическое тепло газа. Кроме того, горячнй газ несет с собой большое количество конденсирующихся горючих веществ (смол, скипидара, фенолов и т. д.), которые увеличивают тепловую ценность газа.

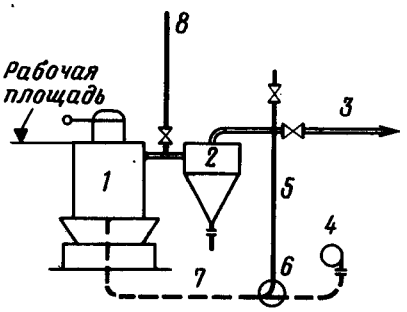


Рис. 11-18. Промышленная схема полученияя горячего газа.

1 — газогенератор; *2* — циклон (при углах); *3* — газопровод к потребителю; *4* — воздуходувка; *5* — паропровод; *6* — смеситель; *7* — паровоздушная смесь; *8* — свеча в атмосферу.

Недостатком схемы получения горячего газа является ограниченность радиуса подачи газа потребителю, так как при большой длине газопроводов возможиость использоваиия физического тепла газа практически отсутствует. Кроме того, горячий газ подается в сеть при небольшом давлении (20—50 *дан/м²*), а следовательно, и с небольшими скоростями (4—8 *м/сек*); поэтому газопроводы получаются громоздкими и для их изготовления требуется большое количество металла.

Газопроводы загрязняются смолой и пылью из-за конденсацни различных составляющих газа при его охлаждении, поэтому газогенераторные станции горячего газа работают рационально лишь при расположении нх в непосредствеиной близости к потребителю. Практически бессмольный газ может быть получен при газификации антрацита и коксика или топлив, дающих смолу при газификации их в обращенных или двухзоиных газогенераторах. Если в газе содержится очень мало смолы, то задача обработки газа чаще всего сводится к очистке его от пыли, охлаждению в целях освобождения от влаги и компрессии до необходимого давления.

Если газ по выходе из газогенераторов содержит значительное количество смолы, то произвести достаточио полное улавливание и отделение ее от воды весьма затруднительно. Поэтому при газификации топлив, дающих смолу, применяется схема, изображенная иа рис. 11-19. Отличительиой особенностью ее является наличие спецнальной аппаратуры для очистки газа от смолы, а именно электрофильтров или дезинтеграторов. Для наиболее эффективной работы смолоочистнтелей температура газа перед ними должна быть иа 10—15 °С выше точки росы для газа, чтобы предотвратить конденсацию в иих влаги и все же обеспечить достаточную коиденсацию смолы и малый объем газа.

Газ из газогенераторов направляется в стояки-охладители, в которых при промывке водой температура его поиижается до 80—90 °С. Одновременно в стояках происходит осаждение части смолы и пыли. Затем газ поступает в смолоотделитель и далее в скруббер (чаще всего трехступеичатый), где окончательно охлаждается и освобождается от влаги и летучих фракций смолы; после этого ои всасывается газодувкой, которая сжимает его до нужного давления и нагнетает в сеть. Для улавливания капелек воды после газодувки устанавливаются каплеуловители. В нижней части трехступеичатого скруббера производится иасыщение дутьевого воздуха водяиыми парами путем орошеиия воздуха горячей водой, поступающей из верхней (газовой) части скруббера.

Описанная схема рациональна при применении газогенераторов со швель-шахтами для торфа или древесной щепы, в которых смола получается неразложеиной, маловязкой, а уиос пыли относительно мал. В случае газификации каменных углей в газогенераторах без швель-шахты из-за сравиительно высоких температур в зоне сухой пере-

гонки (500—700 °С) имеет место значительная степень разложения смолы. Унос и пыль, смешиваясь в смолоотделителях с вязкой смолой, сильно затрудняют работу последних. Поэтому наиболее рациональным является установка сразу же после газогенераторов циклонов для улавливания пыли и уноса.

Высокоэффективные способы газификации твердого топлива

Недостатки газогенераторов с плотным слоем. Присутствие мелочи в буром и каменном углях и антраците сильно затрудняет

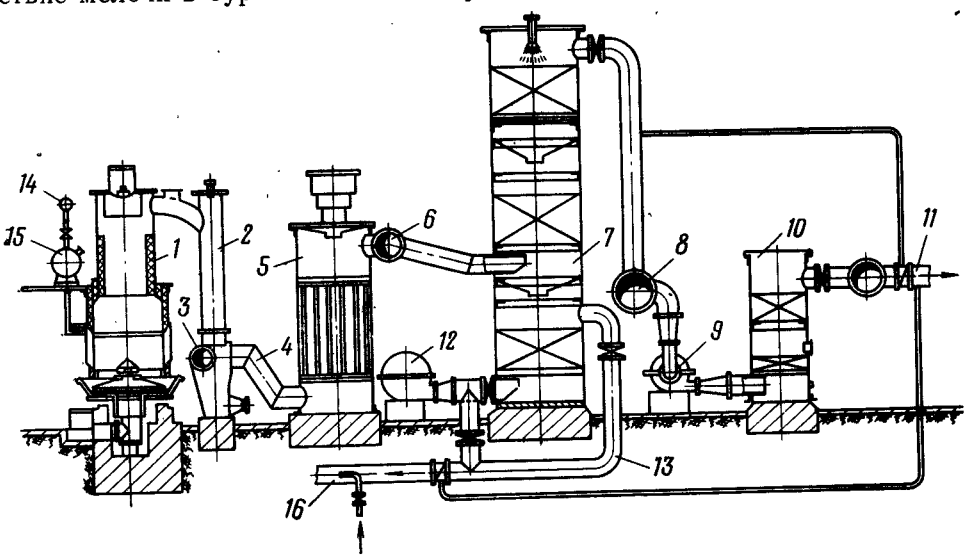


Рис. 11-19. Схема установки для получения газа из топлива, дающих смолу.

1 — газогенератор; *2* — стояк охладительной ступени; *3* — коллектор сырого газа; *4* — газопровод к электрическим фильтрам; *5* — электрофильтр; *6* — газопровод к скрубберам; *7* — трехступенчатый скруббер; *8* — коллектор очищенного газа; *9* — газодувка; *10* — каплеуловитель; *11* — газопровод к потребителю; *12* — воздушный вентилятор; *13* — воздухопровод к газогенераторам; *14* — паровая магистраль низкого давления; *15* — паросборник; *16* — смеситель пара и воздуха.

процесс газификации: производительность газогенераторов уменьшается, увеличивается износ, ухудшаются качество газа и другие показатели работы.

В силу этого к размеру кусков топлива предъявляются жесткие требования, и перед подачей в газогенераторы оно подвергается просеиванию (грохочению) при котором иногда значительная часть топлива отсеивается и направляется для использования, например, в топках паровых котлов.

Другим недостатком газогенераторов с плотным слоем при газификации топлив при атмосферном давлении является их малая производительность[1], и на больших предприятиях для удовлетворения потребности в газе необходимо устанавливать десятки газогенераторов.

Важной задачей является также повышение теплоты сгорания генераторного газа, которая в зависимости от сорта топлива и других факторов при обычной газификации, как было указано выше, равна 4,19—6,71 *Мдж/м*³.

В ряде случаев такая теплота сгорания является недостаточной с точки зрения требований, предъявляемых к газообразному топливу. Кроме того, транспорт низкокалорийного газа из-за большого содержания балласта очень дорог, дальнее газоснабжение становится неэкономичным.

[1] Исключение составляют газогенераторы с жидким шлакоудалением, о чем сказано ниже.

Ниже излагаются методы газификации, способные в той или иной мере устранить указанные недостатки.

Газификация бурых углей в «кипящем» слое. Этот метод обеспечивает интенсификацию газогенераторного процесса благодаря увеличению объема слоя при продувке его воздухом, или, иначе, увеличению высоты слоя по сравнению с плотным слоем.

Особенность кипящего слоя заключается в подвижности частиц в нем и в интенсивном перемешивании частиц по всему слою, чем и отличается кипящий слой от взвешенного, где имеет место некоторая сепарация частиц по их крупности и удельному весу.

Процесс газообразования в кипящем слое аналогичен газообразованию в плотном слое. Здесь также имеются кислородная и восстановительная зоны. Но эти зоны имеют в данном случае большие по высоте размеры. Энергичное перемешивание частиц выравнивает температуру слоя, а так как эта температура значительна по величине, то происходит глубокое разложение продуктов сухой перегонки и в газе содержится мало смол, кислот и фенолов, что, с одной стороны, упрощает их очистку, но, с другой стороны, снижает теплоту сгорания газа. Высокая удельная производительность газогенераторов объясняется тем, что частицы мелкозернистого топлива в кипящем слое находятся в раздвинутом состоянии и совершают вращательно-пульсирующее движение в потоке воздуха и газа. Большая удельная поверхность топлива, энергичное обтекание частиц воздухом и газом, вращательно-пульсирующее движение частиц и их соударение обеспечивают постоянное «обновление» поверхности топлива (благодаря удалению с нее образовавшейся золы) и интенсивное течение реакций газообразования.

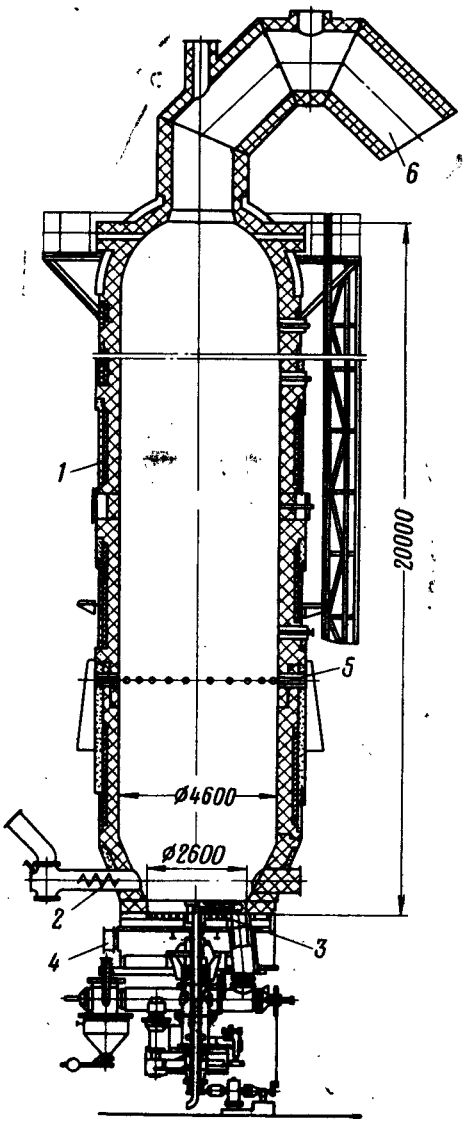


Рис. 11-20. Промышленный газогенератор с кипящим слоем.

1 — шахта газогенератора; *2* — шнек топливоподачи; *3* — колосниковая решетка; *4* — дутьевая камера; *5* — фурмы вторичного дутья; *6* — штуцер выхода газа.

На рис. 11-20 показана конструкция промышленного газогенератора с кипящим слоем, предназначенного для газификации низкосортного топлива (бурый уголь, отходы углей и кокса разных марок). Топливо, поступающее в газогенератор, подвергается предварительной подготовке, заключающейся в подсушке до влажности $W^{р}=7\div12\%$ и в измельчении. Размер частиц топлива допускается 0,5—12 *мм*. Подготовленное топливо подается в приемный бункер газогенератора. Из бункера топливо шнеками непрерывно подается на колосниковую решетку газогенератора. Дутье по-

дают через колосниковую решетку под таким давлением, что слой топлива приходит в движение, напоминающее кипение жидкости. Омываемые газовой средой мелкие частицы угля бурно выделяют газы и могут легко перемешиваться. В плоскости колосниковой решетки имеется спиральная лопасть, выполняющая роль золоудалителя. Часть золы из генератора поступает в коробку и отсюда шнеком подается в сборник золы, откуда непрерывно удаляется. Другая часть золы выносится потоком газа и улавливается в циклонных пылеуловителях.

Газогенератор работает на парокислородном дутье. Около 80% дутья поступает через колосниковую решетку и примерно 20% — через фурмы, расположенные выше слоя топлива. Делается это для того, чтобы можно было в какой-то мере прогазифицировать мелкие угольные частицы, обильно выносимые потоком газа из слоя. Для этой же цели газогенератор имеет большую высоту. Давление дутья под колосниковой решеткой 3 000 *дан/м²*. Давление в самом генераторе поддерживается около 2 500 *дан/м²*. Температура парокислородной смеси 85—100 °С.

Температура слоя не должна быть выше 800—900 °С, поэтому к кислороду или воздуху в большом количестве добавляют пар. При повышенных температурах зола размягчается, частицы топлива начинают слипаться и слой зашлаковывается. При невысоких температурах слоя степень разложения пара очень невелика (около 0,2—0,3). При буром угле напряжение по нижней части шахты газогенератора составляет 1 750 *кг/(м²·ч)* и более.

После газогенератора газ проходит через пылеуловитель и направляется к котлу-утилизатору, производящему пар с давлением 2 *Мн/м²*. Получаемый пар не только покрывает все потребности газификации, но и используется для других целей. После котла газ проходит очистку в батарейных циклонах и в дезинтеграторах и транспортируется в сеть.

Парокислородное дутье применяется при выработке безазотного технологического газа. При выработке энергетического газа (например, для газоснабжения газовых турбин или промышленных печей) газогенераторы могут работать и на паровоздушном дутье, но качество газа при этом снижается. По данным ВНИИГИ, проводившего испытания полупромышленного газогенератора с кипящим слоем на бурых углях (райчихинском, артемовском и бабаевском), теплота сгорания газа при паровоздушном дутье получена равной 4,19—4,61 *Мдж/м³* вместо 8,82—9,23 *Мдж/м³* на парокислородном дутье, к. п. д. газификации при этом составил 50—54, а термический к. п. д. 74—84%. К достоинствам газогенератора с кипящим слоем относятся высокая производительность (один газогенератор может дать до 70 000 *м³/ч* газа) и устойчивый режим работы. Недостатками являются: необходимость предварительной сушки углей с большой влажностью, громоздкость сооружений из-за низкого съема газа с единицы объема газогенератора, большое содержание пыли в газе, что усложняет очистку газа, низкая степень разложения пара и большой удельный расход кислорода.

Газификация топлива под высоким давлением. При высоких давлениях в шахте газогенератора, помимо обычных реакций, продуктами которых являются водород и окись углерода, протекают еще со значительной скоростью вторичные реакции образования метана при взаимодействии водорода с углеродом топлива и окисью углерода:

$$C + 2H_2 \longrightarrow CH_4 + 75{,}5\ Мдж; \qquad (11\text{-}13)$$

$$CO + 3H_2 \longrightarrow CH_4 + H_2O + 204\ Мдж. \qquad (11\text{-}14)$$

Реакция образования метана протекает с резким сокращением объема газов, поэтому повышение давления и благоприятствует их протеканию. Увеличение содержания метана в газе сильно повышает его теплоту сгорания. После удаления из сырого газа значительной части двуокиси углерода (что легко достигается промывкой его под давлени-

ем) теплота сгорания газа при 2 *Мн/м²* достигает 16,7 *Мдж/м³* и выше, и он может быть использован в качестве бытового газа.

Особенностью процесса газификации под давлением является возможность получения большого количества жидких продуктов высокого качества.

При газификации топлива под давлением 2 *Мн/м²* общий выход смолы примерно такой же, как при полукоксовании данного топлива, а выход бензиновой фракции значительно больше, чем при полукоксовании. Увеличение выхода бензина является следствием крекинга смолы под давлением в присутствии водорода. Газогенератор высокого давления схематически показан на рис. 11-21. Такие газогенераторы имеют внутренний диаметр шахты до 2,5 *м*. Для газификации могут быть использованы также и мелкозернистый уголь и отходы угля. Топливо подается в газогенератор из бункера через шлюзовой загрузочный аппарат с двумя затворами. Для удаления шлака из газогенератора применяется зольная шлюзовая камера.

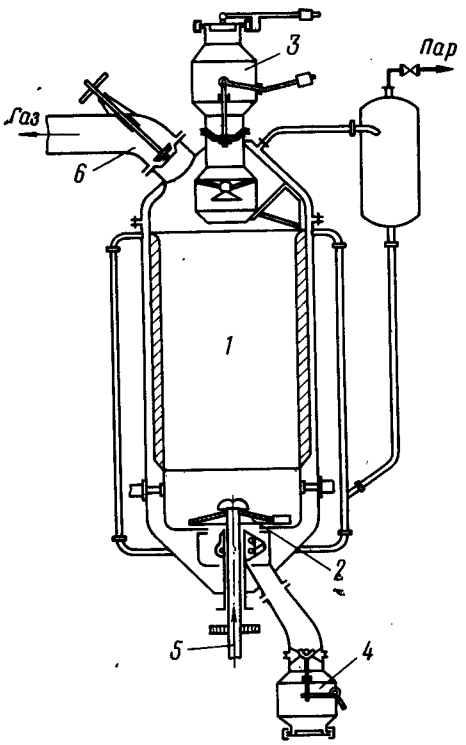


Рис. 11-21. Промышленный газогенератор высокого давления.
1 — газогенератор; *2* — колосниковая решетка; *3* — загрузочное устройство; *4* — зольниковая камера; *5* — подвод дутья; *6* — отвод газа.

В процессе газификации под давлением топливо проходит те же зоны, что и при обычной газификации. Подсушка угля лимитируется отсутствием азота как теплоносителя, поэтому бурый уголь должен подвергаться предварительной сушке и содержание влаги в нем должно быть не выше 20—25%. Напряжение шахты газогенератора при бурых углях составляет примерно 800—1 000 *кг/(м²·ч)*. Высокая производительность газогенераторов обеспечивается резким повышением объемных концентраций газов. Интенсивное течение реакций газообразования при высоком давлении позволяет снизить температуру слоя до 900—1 000 °С и, таким образом, избежать шлакования. Высокая зольность топлива (даже 30—40%) не является препятствием для этого способа газификации, если зола не шлакуется.

В горне газогенератора при продувке слоя топлива горячим воздухом развиваются очень высокие температуры (порядка 1 800 °С и более), чем обеспечивается протекание газогенераторного процесса с превращением золы топлива в жидкоплавкое состояние.

Возможность одновременного получения газа и ценных жидких продуктов при минимальном расходе кислорода и использовании мелкозернистого топлива (3—10 *мм*) составляет преимущество газификации под давлением. Недостатком этого способа является большая сложность оборудования. Трудность изготовления оборудования и его высокая начальная стоимость затрудняют внедрение установок в промышленности.

11-7. ГАЗИФИКАЦИЯ СЕРНИСТОГО МАЗУТА

Изменение структуры топливного баланса страны в сторону увеличения добычи нефти ведет к постоянному увеличению производства топочного мазута. Бо́льшая часть мазутов имеет высокое содержание серы (до 4% и выше). Непосредственное сжигание сернистого мазута в промышленных печах приводит к снижению качества продукции, интенсивному отложению загрязнений на поверхностях нагрева воздухоподогревателей и снижению срока их службы. Выброс больших количеств окислов серы

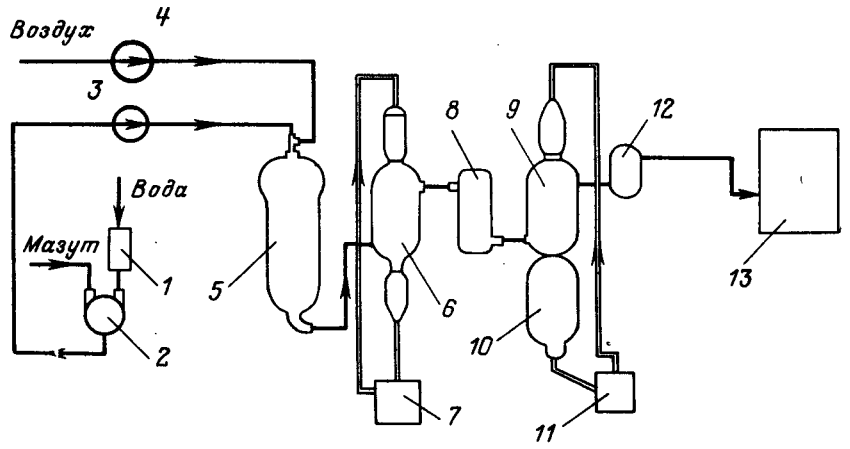


Рис. 11-22. Установка ИГИ для газифнкации мазута с высокотемпературной газоочисткой.

1 — подогреватель воды; *2* — эмульгатор мазута; *3* — насос водомазутной эмульсни; *4* — турбокомпрессор дутья; *5* — газогенератор; *6* — сажеуловитель с высокотемпературным зернистым фильтром; *7* — узел отделения сажи; *8* — охладнтель газа; *9* — сероочнститель: *10* — регенератор CaO; *11* — промежуточная емкость CaO; *12* — пылеуловитель; *13* — потребнтель газа.

вместе с продуктами горения топлива через дымовые трубы ухудшает санитарное состояние воздушного бассейна в районе промышленного предприятия. Эффективным методом преодоления трудностей, возникающих при сжигании сернистых мазутов, возможно, окажется их централизованная безостаточная газификация с последующей высокотемпературной очисткой продуктов от сернистых соединений, сажи и ванадия по методу института горючих ископаемых (ИГИ), а также института ВНИИНП. Теоретическое и экспериментальное исследование метода ИГИ, а также конструктивное оформление аппаратов изложены в [Л. 13а].

На рис. 11-22 приведена схема подобной установки с высокотемпературной очисткой продуктов газификации при небольшом избыточном давлении. Для компенсации потерь давления по газовоздушному тракту предусматривается установка подкачивающего (бустерного) компрессора с электроприводом. Компрессор подает в газогенератор горячий воздух, необходимый для газификации мазута. Остальная часть горячего воздуха направляется в зону горения печи для сжигания очищенного горючего газа. В газогенераторе осуществляется факельный процесс газификации водомазутных эмульсий на воздушном дутье, применение которых обеспечивает необходимое распыление мазута и способствует уменьшению образования сажи. Продукты газификации после газогенератора при температуре 1 100—1 200 °С очищаются в высокотемпературном самоочистителе от сажи и окислов ванадия, проходя через слой зернистого огнеупорного материала (хромомагнезитовая крошка, кварцевый песок). Выгруженный из сажеочистителя зернистый материал отмывается от сажи водой, после чего возвращается в него через шлюзовой затвор. В сероочистном аппарате газ проходит через слой частиц

окиси кальция, где освобождается от сероводорода в результате реакции

$$CaO + H_2S = CaS + H_2O. \qquad (11\text{-}15)$$

Отработанный твердый сероокисный реагент, представляющий собой смесь CaO и CaS, должен быть вывезен с завода-потребителя и использован на химическом заводе для получения серной кислоты.

Получающийся в процессе регенерации твердый реагент (окись кальция) вновь возвращается потребителю. После улавливания твердых частиц в пылеуловителе очищенный горючий газ поступает к горелкам печей для сжигания.

Ниже приведены расчетные показатели процессов газификации, очистки и дополнительные потери тепла, вызванные наличием этих процессов. В расчетах приняты следующие исходные данные:

Элементарный состав горючей массы мазута: $C^r = 84{,}4\%$; $H^r = 11{,}4\%$; $N^r = 0{,}3\%$; $O^r = 0{,}2\%$; $S^r = 3{,}7\%$; $A^c_p = 0{,}14\%$; влага эмульсии 16,3%. Теплота сгорания $Q^p_н = 39{,}6$ *Мдж/кг*. Объемный состав газа на выходе из газогенератора: $H_2O = 4{,}8$; $O_2 = 0{,}19\%$; $CO = 19{,}8\%$; $CO_2 = 4{,}15\%$; $H_2 = 15{,}78\%$; $H_2S = 6{,}37\%$; $N_2 = 54{,}96\%$.

Достигаемая степень очистки газа от сернистых соединений 96—98%.

Температура воздуха на входе в газогенератор, °С	250
Расход воздуха на газификацию 1 *кг* мазута, *кг*	5,94
Расход воды на получение эмульсии на 1 *кг* мазута, *кг*	0,168
Расход тепла на испарение влаги эмульсии, в % от $Q^p_н$ мазута	1,02
Выход сажи на 1 *кг* мазута, %	1
Потери тепла с сажей, % от $Q^p_н$ мазута	0,9
Температура газа на выходе из газогенератора, °С	1 210
Степень очистки газа от сероводорода, %	96
Тепло, уносимое с сероводородом, % от $Q^p_н$ мазута	1,27
Теплота сгорания очищенного газа, *Мдж/м*³	4,25
Плотность очищенного газа, *кг/м*³	1,074
Потери тепла от охлаждения продуктов в газогенераторе и сероочистном аппарате, % от $Q^p_н$ мазута	1,97
К. п. д., учитывающий потери тепла топлива в системе газификации и очистки, %	94,28

Снижение содержания сажи в газе при температуре газов на выходе из газогенератора 1 210°С достигается применением катализаторов.

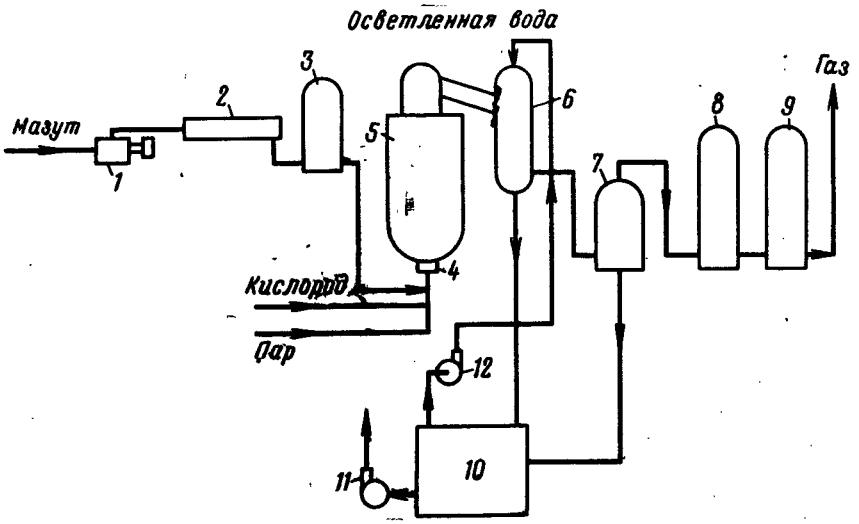


Рис. 11-23. Установка ВНИИНП для газификации мазута.

1 — насос; *2* — подогреватель; *3* — ресивер; *4* — форсунка; *5* — газогенератор; *6, 7* — сажеотделитель; *8, 9* — скрубберы; *10* — отстойник; *11* — насос для шлама; *12* — насос для осветленной воды.

В установке ВНИИНП, схематически представленной на рис. 11-23, газификация мазута осуществляется под давлением 0,5—2 *Мн/м²* на парокислородном дутье. При этом образуется газ, содержащий около 90% водорода и окиси углерода. Процесс газификации производится в газогенераторе, куда подается и парокислородная смесь. Производительность газогенератора 500—1 500 *кг/ч*. Подача мазута в газогенератор обеспечивается одной форсункой. Расход пара на газификацию 1 *кг* мазута составляет 0,3—0,5 *кг*, а кислорода 0,7—0,8 *м³*. Температура в зоне газификации поддерживается в пределах 1 100—1 300 °С. Выходящий из газогенератора газ промывается водой в скруббере и сажеотделителе. Сажа отделяется от охлаждающей воды в отстойнике, и вода снова подается на орошение газа. В качестве окислителя может быть применен воздух. При этом весь воздух, необходимый для процесса газификации, используется как распылитель мазута. Мазут и воздух перед подачей в газогенератор подогреваются соответственно до 100 и 350 °С. Оптимальные показатели этого процесса газификации получаются при удельном расходе воздуха 4,79—4,85 *м³/кг*, что соответствует температуре процесса 1 250—1 270 °С. Показатели процесса газификации мазута на установке ВНИИНП при работе на воздушном дутье таковы:

Температура, °С	1 250—1 270
Давление, *Мн/м²*	0,5; 1; 1,5; 1,8
Состав газа, % по объему:	
CO_2	3,0—2,4
H_2S	0,3
CO	21,6—22,2
H_2	15,6—16,2
CH_4	0,0
N_2	59,5—58,9
Теплота сгорания газа, *Мдж/м³*	4,80—4,95
Расход мазута, *кг/ч*	705—920
Выход газа, *м³/кг* мазута	6,35—6,49
Выход сажи, %	1,0—1,2
К. п. д., %	70,5—74,5

Проводились опыты по газификации эмульгированного мазута (влажность последнего в процентах по весу — 22,4%). При применении эмульсин выход газа и к. п. д. газификации растут по сравнению с процессом газификации мазута на воздушном и паровоздушном дутье. Выход сажи значительно снижается. Сера из мазута в данном случае переходит в основном в газ. При этом 7,4% серы мазута превращается в органические соединения, а остальная часть в сероводород. Наилучшими условиями газификации по данным [Л. 13] следует считать следующие:

Температура, °С	1 300
Удельный расход воздуха, *м³/кг* мазута	4,5
Температура подогрева, воздуха, °С	300

При этом выход газа равен 6,15 *м³* на 1 *кг* мазута при теплоте сгорания 5,12 *Мдж/м³*.

Качественная характеристика газа при этом следующая:

Влагосодержание, *г/м³*	17
Содержание сажи, *г/м³*	3,3
Содержание органических соединений, *мг/м³*	425
Содержание сероводорода, по объему, %	6,4

При попадании эмульгированного мазута в зону с высокой температурой происходит его нагрев, а затем он закипает. Температура кипения воды значительно ниже, чем у мазута, поэтому она закипает раньше, разрывая мазутную оболочку капель и тем самым уменьшая их размеры и увеличивая их общую поверхность. При этом увеличивается относительная скорость капель мазута по отношению к газовому потоку, что в значительной степени интенсифицирует процесс смешения топлива с воздухом и его испарение. Скорость реакции за счет усиленного притока тепла и окислителя также возрастает.

ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ

ТЕПЛОВЫЕ (ТОПЛИВНЫЕ) БАЛАНСЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

12-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Промышленные предприятия являются крупными потребителями топлива. Топливо расходуется промышленными печами, котельными и теплоэнергетическими установками, связанными с производством электроэнергии, технологического пара и горячей воды,

а также с получением кислорода, сжатого воздуха и т. д. В коксохимических установках топливо подвергается термической переработке. В промышленных печах сжигаются природный газ и искусственные горючие газы, мазут, пылевидное топливо и реже (при концентрированном расходе в крупных печах) твердое топливо с той или иной механической подготовкой к сжиганию. Под паровыми котлами заводских ТЭЦ и промышленных котельных часто сжигается твердое топливо.

Для организации рационального топливопотребления и суждения о степени использования топлива составляются тепловые (топливные) и газовые балансы заводов. Они составляются при проектировании предприятий, а также и для действующих заводов в порядке проверки их работы и наметки мероприятий по снижению удельных расходов топлива.

Тепловые балансы составляются для отдельных цехов и для всего завода в целом и отражают закон сохранения энергии. Все виды энергии в тепловых балансах выражаются в одинаковых единицах измерения.

Электроэнергия, затраченная на производство кислорода, на сжатие воздуха и т. д., должна быть приведена к теплоте сгорания *первичного топлива*, т. е. топлива, затраченного на выработку электроэнергии. Тепловые балансы завода составляются *в Гдж* за год, за 1 *ч* работы непрерывно работающего предприятия или на единицу годной продукции. Количества тепла выражают также в условном топливе, имеющем теплоту сгорания 2,94 *Мдж/кг* (7 000 *ккал/кг*); особенно удобно представлять тепловой баланс в условном топливе в том случае, когда завод работает на разных видах топлива. Абсолютные и даже относительные расходы тепла, характерные для данного завода, непосредственно нельзя сопоставлять даже с данными аналогичного завода, так как цифры баланса зависят от многих причин: от производительности предприятия, его технической оснащенности и организации производства, а также от вида используемого топлива. Сравнение может быть произведено только при анализе особенностей того и другого предприятия.

Разумеется, для того чтобы проанализировать тепловой баланс предприятия, нужно хорошо представлять себе технологическую схему производства и особенности технологии. При проектировании тепловые балансы составляют на основании установленных удельных норм расхода тепла, т. е. расходов тепла на единицу годной продукции. Эти нормы устанавливаются на основании теплотехнических расчетов (с учетом технических характеристик оборудования и конкретных условий производства) или опытно-статистическим путем. Особенно сложными являются тепловые балансы заводов (комбинатов) черной металлургии с полным производственным циклом (с доменным и коксохимическим цехами).

12-2. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМБИНАТА

На рис. 12-1 приведен тепловой баланс металлургического завода с производительностью $2 \cdot 10^6$ *т* стали в год. Металлургический завод состоит из доменного, мартеновского, прокатного, энергетического и вспомогательных цехов. Как правило, коксохимические заводы, а тем более коксохимические цехи располагаются в непосредственной близости от металлургического завода. Близкое расположение дает возможность передать коксовый газ на металлургический завод для отопления мартеновских и нагревательных печей. Если химическую энергию всего топлива, поступающего на металлургический завод, принять за 100%, то в коксохимический цех, как видно из рис. 12-1, с углем для коксования поступает 75,9% ее. Полученный кокс сортируется, причем крупный (металлургический) кокс направляется в доменный цех, а коксовые отсевы используются для агломерации и для сжигания под котлами электростанции.

Угли, употребляемые для коксования, подвергаются обогащению, цель которого заключается в уменьшении их зольности. Обогащение осуществляется на месте добычи угля, а также на коксохимических заводах.

Отходы обогащения — промпродукт, хвосты, шлак и пыль — направляются для сжигания в котельных. В рассматриваемом примерном балансе завода процесс обогащения не изображен. Коксохимический цех получает помимо угля доменный газ для отопления коксовых печей (10,2%), пар (3,3%) и электроэнергию (0,96%). Электроэнергия и пар, как уже сказано, даны в пересчете на первичное топливо, т. е. топливо, затраченное на их производство. Химическая теплота кокса составляет 47,7% всего тепла, израсходованного заводом, химически связанное тепло коксового газа 16,1% и химически связанное тепло коксовой мелочи 12,2%. Потери тепла составляют 14,5%; к. п. д. коксохимического цеха составляет 84%.

Рассматривая тепловой баланс *доменного цеха отметим*, что химически связанное тепло кокса, загружаемого в доменные печи, составляет 43,92%; коксовых отсевов, выданных на сторону, 3,78%; доменного газа, сжигаемого в кауперах для нагрева дутья, 3,54%; первичного топлива, затраченного на подачу воздушного дутья в домны 5,38%; на выработку электроэнергии 0,36% и на получение пара 0,84% от химически связанного тепла всего топлива, поступающего на завод. Общий приход тепла составляет 57,82%. Расход тепла на процесс выплавки чугуна на руды (алгебраическая сумма

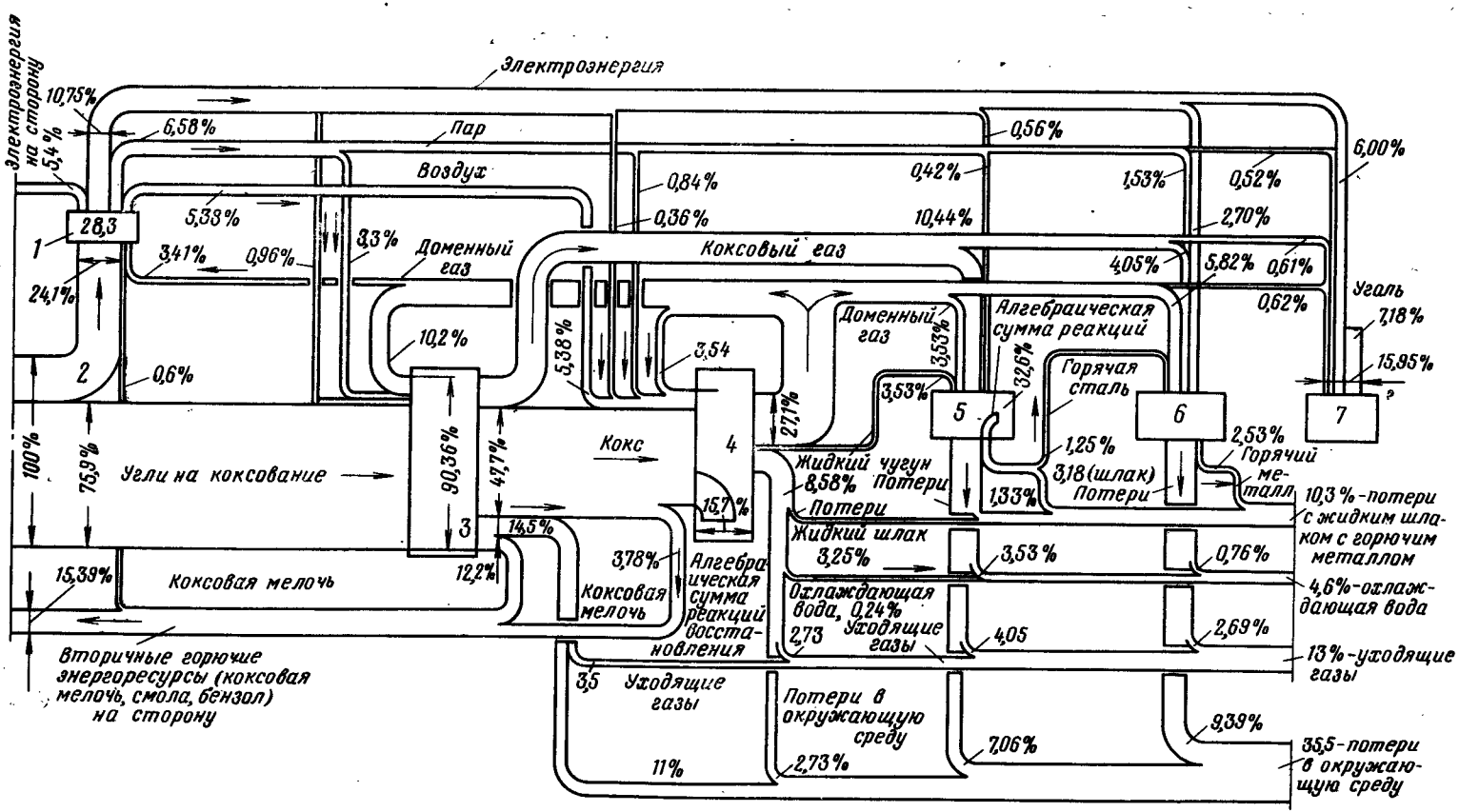


Рис. 12-1. Тепловой (топливный) баланс завода черной металлургии.

1 — энергетические установки; *2* — энергетические угли; *3* — коксовый цех; *4* — доменный цех; *5* — мартеновский цех; *6* — прокатный цех; *7* — вспомогательный цех.

тепла химических реакций) составляет 15,7%, химически связанное тепло доменного газа 27,1%; физическое тепло чугуна, используемое в мартеновскнх печах, 3,53%.

Полезный расход тепла складывается из: тепла, затрачиваемого на доменный процесс, представляющий собой алгебраическую сумму тепловых эффектов химических реакций (15,7% общего расхода тепла на заводе), химически связанного тепла доменного газа (27,1%), химически связанного тепла коксовой мелочи, получаемой при повторном грохочении кокса (3,78%), физнческого тепла чугуна, использованного в мартеновскнх печах (3,53%). В сумме полезный расход составляет 50,11%. Следовательно, к. п. д. цеха будет равен (50,11/57,82)100=86,8%.

Дальнейшее повышение к. п. д. должно идти за счет сокращения потерь тепла и их частичного использования, а также за счет лучшей организации доменной плавки путем интенсифнкации доменного процесса. В доменных печах применяется испарнтельное охлаждение, при котором в охлаждаемых металлических элемеитах печи вырабатывается пар, используемый для технологических и энергетических целей. Принципнально возможио использование фнзнческого тепла шлака. Интенсифнкация домеиного процесса достигается путем: увеличения использования офлюсованного агломерата, жесткого соблюдения кондиций на кокс и сырье, увлажиения дутья, автоматического регулирования параметров дутья, работы с повышенным давлением на колошнике (с одновременным использованнем избыточного давления домениого газа в бескомпрессорных утилизационных газовых турбннах) н путем обогащения воздушного дутья кислородом.

В *мартеновский цех* поступают коксовый и доменный газы, хнмнчески связанное тепло которых составляет соответственно 10,44% и 3,53% химически связанного тепла всего топлива, поступающего на завод. Тепло жидкого чугуна, заливаемого в печи, составляет 3,53%. Химическн связанное тепло топлнва, израсходованного для выработки электроэнергни, потребляемой цехом, составляет 0,56% н пара 0,42%. К. п. д. мартеновского цеха составляет (4,51/18,48) · 100=24,4%.

Такой к. п. д. не может быть признан удовлетворительным.

В гл. 8 уже указывалось, что путем устройства испарительного охлаждения, использования тепла газов в котлах-утнлнзаторах и улучшення тепловой работы печей энергетический к. п. д. мартеновскнх печей может быть доведен до 50—65%, т. е. может быть увеличен в 2 раза и более.

Рассматривая тепловой баланс *прокатного цеха,* можно видеть, что полезное тепло нагретого металла составляет всего 2,53% общего расхода тепла иа заводе, в то время как приход тепла в цех равен 15,4%. Таким образом, к. п. д. прокатного цеха $\frac{2,53}{15,4} \cdot 100=16,4\%$, т. е. весьма невелик. Для повышения его следует усилить степень регенерацин тепла отходящих газов н сократить тепловые потери, а также уменьшнть удельный расход электроэнергин.

В энергетических установках завода расходуется 24,1% всего условного топлива, поступающего на завод. Кроме того, сжигаются избытки доменного газа (и отчасти коксового газа), обусловленные неравномерностью выработки газа н его потреблення. Из рис. 12-1 видно, как распределяется топливо, поступающее в энергоцех. Большая его часть расходуется на выработку электроэнергни (16,5% всего химически связанного тепла, потребляемого заводом); кроме того, оно расходуется на производство пара (6,58%) и на сжатие воздуха для доменных печей (5,38%).

Помимо общего теплового баланса составляются также и *газовые балансы,* позволяющне судить о распределенни разных горючих газов н их нспользования. О газовом балансе завода черной металлургни сказано было ранее.

Описанный тепловой баланс является *замкнутым*: кауперы и коксовые батарен работают на доменном газе, а все мартеновские и нагревательные печн — на смеси коксового и доменного газа (этн газы смешиваются в разных соотиошениях, что позволяет получить теплоту сгорания от 4,62 до 9,64 *Мдж/м*^{3}, причем смешаниый газ с большей теплотой сгорания расходуется на отопленне мартеновскнх печей). Дефицнта в газообразном топливе на данном заводе нет. Твердое топлнво расходуется так: уголь — в энергетических цехах — на ТЭЦ и на паровоздуходувиой станцин (ПВС), а кокс — в доменных печах.

В последиие годы на заводах внедряется прогрессивная технология, обеспечивающая высокую пронзводнтельность предприятня и позволяющая снизить себестонмость металла. В доменных печах увеличнвается подогрев дутья — вместо 800—950 °С воздух нагревается до 1 250 °С, а нногда и более, что резко повышает температуру горення кокса в горне, увеличивает интенсивность плавки в домеиных печах на 10—15% и позволяет снизить удельный расход кокса на 5%. Есл ранее на нагрев дутья в кауперах расходовали 16—20% доменного газа, то для нагрева дутья до 1 000 °С требуется затратить 30—40% всего вырабатываемого газа, а прн более высоком нагреве требуется нагревать компоненты горення (воздух и доменный газ) до 300—500 °С. Для обеспечения высокого нагрева дутья на Магнитогорском металлургнческом комбинате н на других заводах кауперы отапливаются смешанным коксодоменным газом с теплотой сгорания 4,19—4,62 *Мдж/м*^{3}.

Следующим мероприятием, улучшающим работу доменных печей, является повышение давленння на колошнике с 10—15 *кн/м*^{2} до 250—350 *кн/м*^{2} и более. Прн повы-

шенном давлении газы лучше распределяются по сечению, интенсифицируется тепло- и массообмен в рабочем пространстве печи и ускоряется весь ход печи (усиливаются косвенные восстановительные реакции), снижается температура на колошнике.

Повышение давления увеличивает содержание двуокиси углерода в доменном газе и одновременно действует в сторону уменьшения его теплоты сгорания. В настоящее время в СССР чугун выплавляется в печах с повышенным давлением. Разработаны проекты использования избыточного давления доменного газа в специальных газовых турбинах, в которых рабочим телом является доменный газ. При помощи таких газовых турбин можно осуществлять привод как электрогенераторов, так и турбовоздуходувок.

Той же цели — улучшению работы доменных печей — служит увлажнение дутья и обогащение его кислородом, а также применение офлюсованного агломерата. Искусственное увлажнение дутья устраняет вредное влияние колебаний естественной влажности, усиливает разложение водяного пара по реакции $C+H_2O \longrightarrow CO+H_2$ и увеличивает восстановительную способность газов за счет обогащения их водородом. Увлажнение дутья особенно эффективно в сочетании с увеличением температуры горения кокса за счет подогрева дутья и обогащения дутья кислородом. При нагреве дутья до 1 200 °С влагосодержание воздуха можно довести до 50—60 *г/м*³ вместо обычных 5—10 *г/м*³ при естественной влажности. Увеличение же влагосодержания воздуха на каждые 10 *г/м*³ повышает интенсивность плавки на 3—3,5% и снижает удельный расход кокса на 1,4%. Обогащение дутья кислородом повышает температуру, а в доменном газе растет

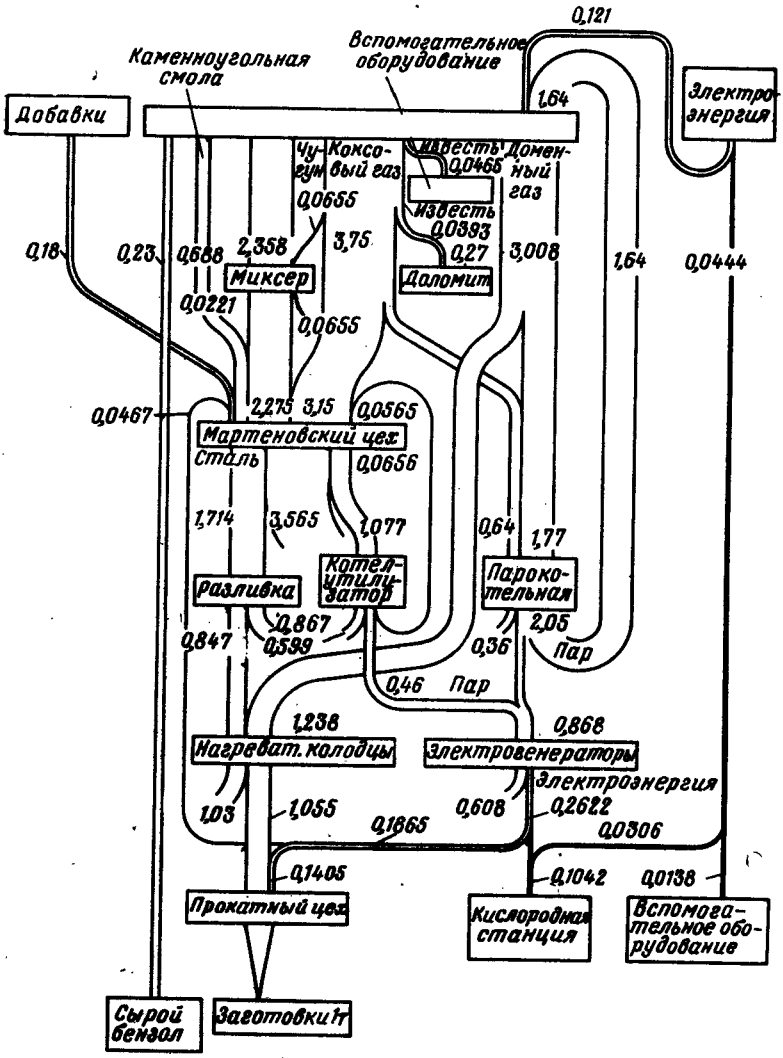


Рис. 12-2. Тепловой баланс металлургического завода с полным циклом при применении в мартеновском процессе кислорода.

содержанне окиси углерода CO и увелнчивается теплота сгорання газа. Прн увелнчении содержання кислорода O_2 с 21% (содержание кислорода в атмосферном воздухе) до 25% производительность печи увеличивается на 14%. Суммарно от применения всех четырех меропрнятнй нитенсивность плавкн может быть увеличена на 30—35%, а удельный расход кокса снижен на 28—32%. Дальнейшее увелнченне содержания кислорода в дутье вызывает трудностн в ходе печи н образование ядовнтой закиси азота NO. Однако прн вдуванин прнродного газа обогащение дутья кислородом доводят до 30%. Прн этом получается экономия кокса н улучшение работы доменных печей.

Топлнвный баланс завода в опнсанных условнях замкнуть нельзя, вследствие чего имеет место дефицит топлнва, который покрывается дополнительным расходованием прнродного газа, мазута или твердого топлива.

Тепловой баланс завода черной металлургнн, нзображенный на рис. 12-1, выражен в процентах от всего тепла топлива, поступнвшего на предпрнятне. Рассматрнвая этот баланс, можно представнть себе распределение топлива по отдельным цехам (операциям), но нельзя оценить, насколько рационально расходовалось топлнво, так как относительный расход топлнва на данную операцию a очевидно зависит от общего потребления топлива заводом:

$$a = \frac{A}{B} 100\%,$$

где A — расход условного топлива на данную операцию; B — общее потребление топлива заводом.

Если расход топлнва A вполне рационален, а расход топлива B очень велик, то, очевидно, относнтельный расход топлива a не дает правильного представления о рациональном для данного случая строения теплового баланса. Поэтому часто тепловые балансы составляют в тепловых еднницах, относя расход тепла к 1 *т* слитков. Примерами являются тепловые балансы, изображенные на рис. 12-2 и 12-3.

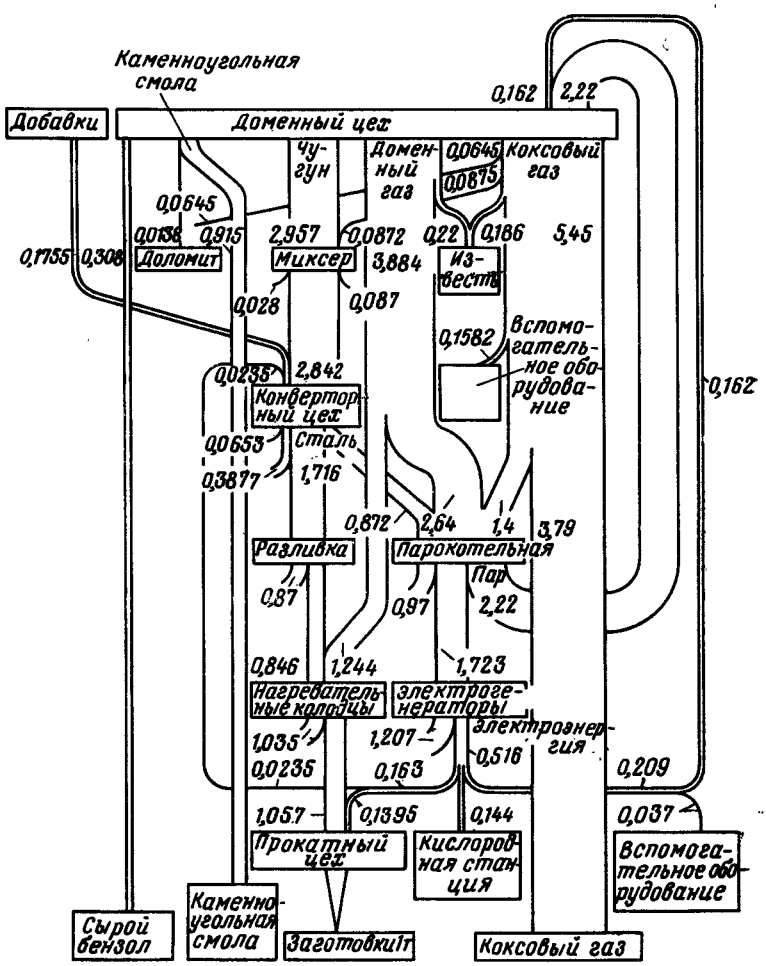
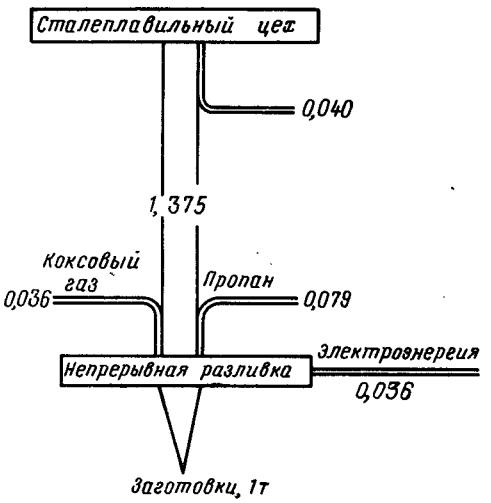


Рис. 12-3. Тепловой баланс металлургического завода с полным циклом при применеиии кислородно-конверторного процесса.

На рис. 12-2 показан рациональный тепловой баланс завода черной металлургии с полным циклом при применении кислорода в мартеновском производстве [Л. 1]. Мартеновский процесс с применением кислорода является промежуточным между обычным мартеновскнм и кислородно-конверторным процессами. Длительность плавкн в больших печах может быть снижена до 4—5 *ч*. Удельный расход коксового газа составляет 3,15 *Гдж/т* (прн отношенни чугуна к скрапу 60÷40), в то время как без применения кислорода он составляет 3,75 *Гдж/т*. Расход кислорода составляет 34 *м³/т*. Цифры на рисунке представляют расходы тепла, выраженные в *Гдж/т*.

Мартеновские печи работают на коксовом газе, что обеспечнвает их высокую производительность: доменный газ расходуется на отопление главным образом паровых котлов ТЭЦ н частично — нагревательных колодцев. Из всего химически связанного тепла израсходованного коксового газа, равного 3,15 *Гдж/т*, в котлах-утнлизаторах используется 1,08 *Гдж/т*, или 34%. Выработанный в них пар идет на выработку электроэнергии для кислородной станции и для привода прокатных станов.

На рис. 12-3 изображен тепловой баланс завода с примененнем кислородно-конверторного (взамен мартеновского) передела [Л. 1]. Кислородные конверторы не имеют отопления, т. е. в ннх не расходуется топлнво, если соотношение скрапа к жндкому чугуну не превышает 1 : 3. Из графика внднo, что в этом случае большая часть коксового газа высвобождается и он может быть использован для химнческой переработкн и других целей. Расход кислорода в этом случае составляет 47—49 *м³/т*.



Рнс. 12-4. Удельный тепловой баланс для установки непрерывной разливки.

Приведенные выше прнмеры тепловых балансов составлены для предприятий, где разливка стали производится в нзложницы н слитки прокатываются на обжимных станах. Переход к непрерывной разливке стали приводит к существенному измененню теплового баланса предприятия. Установки непрерывной разливкн позволяют отказаться от нагрева слитков в нагревательных колодцах и их прокатки. Это вызывает значительное снижение расхода тепла и электроэнергии. Кроме того, примерно на 12% возрастает выход годного, что в конечном счете также приводит к снижению расхода тепла и электроэнергии.

Удельный тепловой баланс для установки непрерывной разливкн дан на рис. 12-4. Электроэнергия здесь расходуется на работу механизмов н насосов системы охлаждения, а также на пронзводство кислорода для резки заготовки. Для резки заготовки расходуется н пропан. Коксовый газ (его может заменить прнродный газ или мазут) необходим для подогрева промежуточного ковша.

12-3. ТЕПЛОВЫЕ БАЛАНСЫ ДРУГИХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Промышленные печи машиностроительных заводов работают лнбо на мазуте, лнбо на газообразном топлнве. Чаще всего используется природный н редко генераторный газ. Иногда заводы получают нефтяной газ от блнзлежащих нефтеперерабатывающих заводов. Котельные установки заводских ТЭЦ часто работают на местном твердом топливе — бурых н каменных углях, антрацнте, торфе н т. д. Печн кузнечных цехов потребляют большую часть газообразного топлива, другую часть газа (меньшую) расходуют печн термическнх н другнх цехов. Литейные цехн употребляют кокс и лнтейный антрацит для вагранок и отчасти газовое топливо для термических печей.

На машиностроительных заводах работает значительное колнчество электрических печей: в литейных цехах — плавильные дуговые н нндукцнонные печи, в термических и других цехах — печн сопротивления и ндукционные. В связн с внедрением в кузнечную практику ковочных прессов и необходимостью иметь безокислительный нагрев металла помнмо газового прнменяется н индукционный нагрев заготовок.

На заводах тяжелого машиностроения и судостронтельных имеются мартеновские печи, работающие на мазуте нли на природном газе. Для примера на рис. 12-5 приведен график теплового баланса завода тяжелого машиностроения. Сталелитейный цех этого завода оборудован мартеновскими печамн, а чугунолитейный цех — вагранками.

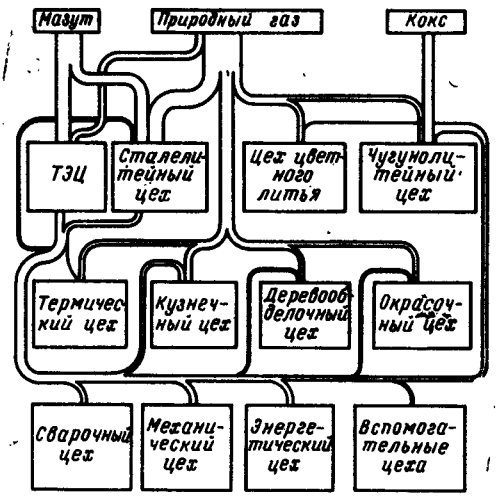


Рис. 12-5. Схема теплового баланса завода тяжелого машиностроения.

Тепловые (топливные) балансы заводов силикатиой промышленности более просты. Это объясняется меиьшим числом тепловых агрегатов. Печи этих заводов работают на природном газе, мазуте или пылеугольном топливе. Твердое топливо используется для шахтных и камерных печей со слоевыми топками. На ряде предприятий используются электрнческие печи. Особенностью силикатного производства является возможность нспользования для сушки материалов и изделий отходящих газов и воздуха из зоны охлаждения готовой продукции после обжига.

Приведем в качестве еще одного примера тепловой баланс нефтеперерабатывающего завода, оборудованного трубчатыми печами, в которых осуществляются крекинг н пиролиз нефти с последующей разгонкой в теплообменниках продуктов переработки с полученнем светлых моторных топлив, масел и других веществ с одиовременным выходом мазута, иефтяиого крекинг-газа и пиролизного газа.

Тепловой (топливно-энергетический) баланс нефтеперерабатывающего завода

Приход тепла, %		
Теплота сгорания топлива (мазута и газа) и физическое тепло иефтепродуктов		55,8
Тепло пара и горячей воды, поступающих на завод		36,8
Тепло, эквивалентное потребляемой электроэнергии		7,4
Всего		100,0
Расход тепла, %		
Потери тепла:		
с охлаждающей водой	54,1	86,0
с газами, отходящими от печей	16,5	
в окружающую среду	8,0	
с форсуночным паром	0,21	
при траиспортировании тепла	2,3	
при транспортировании электроэнергии	0,1	
от невозврата конденсата	2,4	
Прочие потери тепла	2,39	
Полезное тепло		
затраченное на электропривод и освещение	7,3	14,0
затраченное на общезаводское хозяйство	3,9	
готовой продукции	1,4	
возвращеиного конденсата	1,4	
Всего		100,0

Топливом для печей рассматрнваемого завода являются мазут и нефтяиой газ. Основными потерями являются потери тепла с водой, охлаждающей продукты перегонкн в теплообменниках, и тепла отходящнх продуктов горения. Горячне газы, отходящие от печей, используются в значительной мере в котлах-утилизаторах для выработки пара.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Щукин А. А.** Газовое и печное хозяйство заводов. М., «Энергия», 1966.
2. **Глинков М. А.** Основы общей теории печей. М., Металлургиздат, 1962.
3. **Скворцов А. А., Акименко А. Д., Кузелев М. Ф.** Безокислительный и малоокислительный нагрев стали под обработку давлением. М., «Машиностроение», 1968.
4. **Китаев Б. И.** и др. Теплотехнические расчеты металлургических печей. М., «Металлургия», 1970.
5. **Лебедев П. Д. и Щукин А. А.** Теплоиспользующие установки промышленных предприятий. М., «Энергия», 1970.
6. **Иванов Ю. В.** Основы расчета и проектирования газовых горелок. М., «Энергия», 1966.
7. **Спейшер В. А.** Сжигание газа на электростанциях и в промышленности. М., «Энергия», 1966.
8. **Мурзаков В. В.** Основы теории и практики сжигания газа в паровых котлах. М., «Энергия», 1969.
9. **Гусовский В. Л., Лифшиц А. Е., Тымчак В. М.** Газогорелочные устройства и системы отопления нагревательных и термических печей. М., «Металлургия», 1967.
10. **Михеев В. П.** Газовое топливо и его сжигание. М., «Недра», 1966.
11. **Сыромятников Н. И., Рубцов Г. К.** Тепловые процессы в печах с кипящим слоем. М., «Металлургия», 1968.
12. **Карабин А. И., Раменская Е. С., Энно И. К.** Сжигание жидкого топлива в промышленных установках. М., «Металлургия», 1966.
13. **Белосельский Б. С., Покровский В. Н.** Сернистые мазуты в энергетике М., «Энергия», 1969.

13а. **Аидрющенко А. И., Альтшулер В. С. и др.** — «Известия вузов. Энергетика». 1971, № 3, с. 46—51.

14. Тепловой расчет котельных агрегатов, нормативный метод. М., Госэнергоиздат, 1959.
15. **Чечеткин А. В.** Высокотемпературные теплоносители. М., «Энергия», 1971.
16. **Иванцов Г. П.** Нагрев металла. М., Металлургиздат, 1948.
17. **Ключников А. Д., Иванцов Г. П.** Теплопередача излучением в огнетехнических устаиовках. М., «Энергия», 1970.
18. **Шорин С. Н.** Теплопередача. М., «Высшая школа», 1964.
19. **Рафалович И. М.** Тепловые расчеты пламенных печей. М., Металлургиздат, 1949.
20. **Забродский С. С.** Высокотемпературные устаиовки с псевдоожижеиным слоем. М., «Энергия», 1971.
21. **Александров В. Г.** Паровые котлы малой и средней мощности. Л., «Энергия», 1972.
22. **Щукии А. А.** Теплообмен в рекуперативных и регенеративных воздухонагревателях. Проблема высокоэффективиого воздухоподогревателя. Изд. ВЗПИ, 1971.
23. **Мигай В. К. и др.** Регенеративные вращающиеся воздухоподогреватели. Л., «Энергия», 1971.
24. **Горбис З. Р.** Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозиых потоков. М., «Энергия», 1970.
25. **Аптерман В. Н., Тымчак В. М.** Протяжные печи. М., «Металлургия», 1969.
26. **Семененко Н. А.** Вторичные энергоресурсы промышленности и энерготехиологическое комбинировзиие. М., «Энергия», 1968.
27. Сталеплавильное производство. Справочник, т. 2, гл. 23. Котлы-утилизаторы. М., «Металлургия», 1964.
28. **Златопольский А. Н., Завадский И. М.** Экономика промышленной теплоэнергетики. М., «Высшая школа», 1968.
29. **Бережинский А. И., Хомутинников П. С.** Утнлизация, охлаждение и очистка конверторных газов. М., «Металлургия», 1967.
30. **Аидоньев С. М.** Испзрительное охлаждение металлургических печей. М., Металлургиздат, 1961.
31. **Ионин А. А.** Газоснабжение. М., Изд-во лнтературы по строительству, 1965.
32. **Курюкии С. А.** Системы газоснабжения предприятий. М., Гостоптехиздат, 1962.

АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ ЩУКИН

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПЕЧИ И ГАЗОВОЕ ХОЗЯЙСТВО ЗАВОДОВ

Редактор *В. В. Мурзаков*
Редактор изд-ва *Л. Н. Синельникова*
Технический редактор *Т. Н. Хромова*
Переплет художника *Н. Т. Ярешко*
Корректор *И. А. Володяева*

Сдано в набор 20/X 1972 г.
Подписано к печати 23/III 1973 г. Т-04778
Формат 70×108¹/₁₆ Бумага типографская № 1
Усл. печ. л. 19,6 Уч.-изд. л. 24,48
Тираж 20 000 экз. Зак. 1393 Цена 1 р. 01 к.

Издательство «Энергия». Москва, М-114,
Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров
СССР по делам издательств, полиграфии
и книжной торговли. Москва, М-114,
Шлюзовая наб., 10.