И. Ш. Исламов

ПЕЧИ ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

М. Ш. ИСЛАМОВ

ПЕЧИ ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Изд. 2-е, переработанное и дополненное

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ХИМИЯ»
Ленинградское отделение
1975

И87
УДК 66.041

Исламов М. Ш.

И87 Печи химической промышленности. Изд. 2-е, пер. и доп. «Химия», 1975.

В книге дана современная теория печей. Описаны конструкции большинства типов печей химических производств, топок и методики их расчетов. Приведены сведения об огнеупорных, кислотоупорных и изоляционных материалах, применяемых в строительстве печей, топок, боровов, и дана методика расчета футеровки. В книге приведены рекомендации по сушке и пуску печей, а также техника безопасности при их эксплуатации.

Книга предназначена инженерно-техническим работникам химических заводов, занятых эксплуатацией печей; технологам и теплотехникам проектных организаций и работникам научно-исследовательских институтов, а также в качестве пособия студентам вузов химических и теплотехнических специальностей. Первое издание вышло в 1969 г.

Стр. 432, табл. 76, рис. 195. Список литературы 172 названия.

$\text{И}\ \frac{31402\text{-}135}{050\ (01)\text{-}75}\ 135\text{-}75$

© Издательство «Химия», 1975

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 4

Глава I. **Основы термотехнологической теории печей** 5

Введение 5
Термотехнологические процессы 6
Химические превращения исходных материалов в печи 6
Физико-химические превращения материалов в печи 7
Теплотехнические процессы 13
Тепловая энергия для работы печей 13
Теплопередача 24
Движение газов и материалов в печи 29
Тепловая работа футеровки 30

Глава II. **Печи** 32

Классификация печей 32
Печи производства серной кислоты 34
Общие сведения 34
Классификация печей 37
Печи для обжига колчедана 37
Печи для сжигания серы 58
Печи производства соляной кислоты 63
Общие сведения 63
Печь синтеза хлористого водорода 64
Печи муфельные сульфатсоляные 69
Печи производства термической фосфорной кислоты 72
Общие сведения 72
Печь для сжигания фосфора 74
Печи производства плавиковой кислоты 76
Общие сведения 76
Печь плавиковая с вращающимся барабаном и наружным обогревом 77
Печь плавиковая с вращающимся барабаном и внутренним обогревом 80
Печи производства кальцинированной соды 82
Общие сведения 82
Содовая печь 84
Печи производства минеральных солей 95
Общие сведения 95
Печи цианамидные 95
Печь шахтная для получения плава сульфида натрия 98
Печи с вращающимся барабаном для получения плава хлорида бария 102
Печи производства желтого фосфора 108
Печи производства карбида кальция 120
Печи производства минеральных пигментов 149
Печи производства светящихся составов 173
Печи для обжига известняка 179
Печи производства катализаторов 196
Печи с вращающимся барабаном 214
Печи производства сероуглерода 234
Печь производства и регенерации активированного антрацита в кипящем слое 240
Печи для сжигания отходов химических производств 244
Печи ремонтных цехов 263

Глава III. **Топки** 268

Конструкции отдельно стоящих топок 268
Выбор сжигающих устройств 274
Определение объема топочной камеры 276
Определение длины камеры горения топки 279

Глава IV. **Элементы печей и вспомогательное оборудование** 281

Материалы для строительства печей и боровов 281
Футеровка печей 281
Футеровка боровов 324
Фундаменты печей 332
Металлы 333
Кожухи печей 334
Каркасы 337
Сжигательные устройства 339
Форсунки мазутные 375
Тяго-дутьевое оборудование 406
Гидравлическое сопротивление 406
Выбор вентиляторов 407
Выбор дымососов 407

Глава V. **Эксплуатация печей** 408
Пуск печей 408
Розжиг печей 411
Разогрев печей 413
Остановка печей 413
Охрана труда и техника безопасности при эксплуатации печей 414
Литература 422

ПРЕДИСЛОВИЕ

В современном химическом производстве многие процессы осуществляются при высоких температурах в печах различных конструкций. От правильного выбора типа печи, ее расчета и конструктивного оформления зависит рациональная и бесперебойная работа всего предприятия.

Данная книга является продолжением обобщения опыта работы печей и их систематизации в химической промышленности, опубликованном в первом издании книги.

В книге рассматриваются основы современной термотехнологической теории печей, которая, по мнению автора, дает наиболее полное и правильное представление о печах всех типов и разновидностей, а также их производственной принадлежности.

Автор выражает глубокую благодарность кандидату технических наук Шляпинтоху Л. П., выполнившему большую работу по рецензированию рукописи и давшему полезные замечания, кандидатам технических наук Белову В. Н., Данцису Я. Б., инженерам Лядскому Н. К., Кагановичу Л. А. и Еникееву В. Ф. за ценные советы, данные при выполнении настоящей работы

Автор с благодарностью примет отзывы и замечания читателей.

Глава I

ОСНОВЫ ТЕРМОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ПЕЧЕЙ

ВВЕДЕНИЕ

Современная теория печей возникла на стыке технологии, физической химии и теплофизики. В печах всех типов, разновидностей и производственной принадлежности происходят термотехнологические и теплотехнические процессы. В основу термотехнологической теории печей положено то, что главным и определяющим процессом, протекающим в печах, является технологический процесс. Последний осуществляется при тепловом воздействии (подвод или отвод тепла) на обрабатываемые материалы, и он является смыслом и назначением печей.

Термотехнологические процессы определяют необходимый тепловой режим в печи и атмосферу в ней. Теплопотребление для проведения непосредственно эндотермических реакций или тепловыделение при проведении экзотермических реакций в печах определяется только тепловыми эффектами реакций и не зависит от условий теплообмена и от способов получения тепла.

Тепловая составляющая термохимической реакции неотделима от технологического процесса и поэтому его необходимо рассматривать с энергетической базой реакции как единое целое совместно в их взаимосвязи и взаимной обусловленности. Получение тепла, передача тепла к обрабатываемым материалам или отвод их, тепловая работа футеровки, движение газов и материалов рассматриваются совместно как процессы, также находящиеся между собой во взаимной связи и взаимной обусловленности. Эти процессы обеспечивают скоростное и наиболее полное проведение главного процесса в оптимальных условиях.

Как термотехнологические, так и теплотехнические процессы в печах протекают одновременно и в одной установке, поэтому современная теория печей должна рассматривать их совместно, но учитывать при этом роль каждого из них.

Таким образом, *промышленная печь — термотехнологическое устройство, предназначенное для осуществления химических и физико-химических превращений исходных материалов путем тепловой обработки их при оптимальных температурах.*

ТЕРМОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Термотехнологические процессы, протекающие в печах, состоят из: а) химических превращений исходных материалов, состоящих в изменении химического состава; и б) физико-химических превращений исходных материалов, в которых происходит изменение структуры веществ, отражающиеся на агрегатном состоянии или кристаллической модификации их.

Рассмотрение термотехнологических процессов включает в себя:
химическую кинетику процесса;
тепловой эффект химической реакции;
потребление и выделение тепла;
тепловой и температурный режимы в печах;
горение и взрыв.

Химические превращения исходных материалов в печи

Химические реакции, протекающие в печи, можно разделить на простые и сложные. Если одного стехиометрического уравнения достаточно, чтобы описать протекание данной реакции, то ее относят к простым реакциям. Если же для описания наблюдаемого течения реакции необходимо несколько стехиометрических и кинетических уравнений, то ее относят к сложным реакциям.

Сложные реакции разделяются на следующие типы:
последовательные, или консекутивные

$$A + R \longrightarrow S$$

параллельные

$$A \longrightarrow R \quad \text{(целевой продукт)}$$
$$A \longrightarrow S \quad \text{(побочный продукт)}$$

смешанные

$$A + B \longrightarrow R \qquad R + B \longrightarrow S$$

Приведенная смешанная реакция является параллельной по отношению к компоненту B и последовательной по отношению к компонентам A, R и S.

Реакция термического разложения — химические реакции, при которых сложные химические соединения при тепловом воздействии распадаются на более простые соединения или даже на элементы. Вместе с тем свободные элементы в реакторе могут взаимодействовать с кислородом или серой.

Термическому разложению в печах чаще всего подвергаются: карбонаты, окислы, гидраты, силикаты, фосфориты, антрациты, нефть, мазут и т. д.

Реакции обменного разложения — реакции, когда из одной пары веществ образуется другая, путем простого обмена ионами, например:

$$MeO + Me'S \rightleftarrows Me'O + MeS$$
$$2MeO + MeS \rightleftarrows 3Me + SO_2$$
$$MeO + Me' \rightleftarrows Me'O + Me$$

Первые две реакции протекают при плавке на штейн и переработке штейнов в производстве цветных металлов. Последняя реакция происходит при огневом рафинировании и доводке металлов.

Реакции окислительно-восстановительные. Каждая реакция сопровождается перемещением электронов; условно эту реакцию можно разделить на два процесса:

1) окисление компонентов (целевой продукт в печи получается в результате окисления);

2) восстановление компонентов (целевой продукт в печи получается в результате восстановления его).

Окисление компонентов. Окислительные реакции, проводимые в печах, включают в себя окисление простых веществ с получением их окислов. Они протекают при получении фосфорного ангидрида сжиганием фосфора; серного ангидрида сжиганием серы; хлористого водорода сжиганием водорода в среде хлора и т. д. Окислительные реакции лежат в основе обжига и плавки сульфидных руд и концентратов в цветной металлургии.

Реакции окисления металлов составляют основу процессов огневого рафинирования.

Восстановление компонентов. Восстановительные реакции составляют основу восстановительной плавки окисленного рудного сырья и полупродуктов цветных металлов. (Восстановление из руд фосфора, марганца, серы из отходящих газов после сорбции, сульфита натрия из сульфата натрия, баритового концентрата, получение трехокиси мышьяка и т. д.).

Главные восстанавливающие реагенты — углерод и окись углерода. Значительно меньшее значение как восстановителя имеет водород и углеводороды. В сложных системах особенно в расплавах восстановителем могут быть металлы, имеющие повышенное сродство к кислороду.

Физико-химические превращения материалов в печи

К физико-химическим превращениям материалов, проводимым в печах, относятся: а) изменение агрегатного состояния вещества; и б) изменение кристаллической структуры вещества.

Плавление. Для отливки деталей машин и заготовок для механической обработки применяют литейные сплавы, обладающие, кроме основных, еще и литейными свойствами, позволяющими получить из них качественные фасонные отливки.

Литейные сплавы требуемого состава и необходимой температуры нагрева получают плавлением в печах.

Плавление — это процесс перехода кристаллического твердого тела в жидкость (фазовый период первого рода). Плавление как частичную аморфизацию тела связывают с нарушением «дального порядка» при сохранении «ближнего порядка» в его структуре. Плавление совершается при постоянной температуре, называемой температурой плавления $t_{пл}$, величина которой определяется природой тела и зависит от внешнего давления.

Для приведения тела в жидкое состояние необходимо затратить энергию на преодоление сил, действующих между элементами его решетки: плавление наступает тогда, когда средняя энергия колебаний элементов решетки достаточно велика для известного нарушения связи между ними.

Молекулярно-кинетическая теория плавления исходит из положения, что уменьшение степени порядка в расположении частиц твердого тела начинается задолго до плавления в связи с увеличивающейся тепловой подвижностью частиц с повышением температуры. При этом растет число точечных дефектов структуры, что способствует разрыхлению кристаллической решетки. С дальнейшим повышением температуры в непосредственной близости от $t_{пл}$ кристаллографически правильное расположение частиц теряет устойчивость, причем решающая роль в разрушении «дального порядка» переходит к появляющимся более или менее значительным флуктуациям плотности, в которых участвует значительное число атомов.

Испарение. Процесс испарения металлов и различных химических соединений имеет важное значение, так как он является основой производства ртути, цинка, магния, мышьяка и других металлов, а также при получении минеральных пигментов.

Термодинамическая характеристика процессов испарения для различных металлов и химических соединений может быть получена из диаграмм зависимости равновесного давления паров от температуры. По этим диаграммам могут быть определены температуры кипения металлов и их соединений при давлении 10^5 Па, а также равновесные давления пара для различных температур.

По термодинамическим данным могут быть определены тепловые режимы печей, в которых ведутся процессы возгонки металлов и соединений.

Термическая обработка металлов и материалов основана на изменении кристаллической решетки металла при тепловом воздействии.

Одним из видов термической обработки является нагрев металлов и сплавов с целью повышения пластичности и ковкости. Другим — обработка готовых изделий для получения требуемой кристаллической структуры, снятия наклепа, улучшения качества поверхности и т. п.

Химическая кинетика представляет собой учение о скоростях химических реакций, о факторах, определяющих эти скорости, а также о механизме химических реакций. Скорость химической реакции служит важнейшей количественной характеристикой химического взаимодействия.

Недостаточно знать только степень химического превращения. Важно знать, за какое время можно осуществить эти превращения и какое количество продукции будет при этом получено — ведь именно от этого зависит производительность данной печи. Установив факторы, от которых зависят эти скорости, можно найти способы ускорения протекания полезных реакций и замедления ненужных или вредных процессов.

Все термохимические процессы сопровождаются потреблением или выделением тепла и поэтому без подвода или отвода тепла невозможно проведение процесса. Скорость многих реакций зависит от условий теплопередачи и температуры, при которой они проводятся. Так с повышением температуры скорость возрастает и лишь у некоторых многостадийных реакций уменьшается. Температурная зависимость скорости реакции в основном определяется изменением константы скорости реакции. Зависимость скорости реакции от температуры, выраженная графически, дает круто поднимающуюся по экспоненциальному закону кривую. Зависимость скорости химической реакции от температуры предложена Аррениусом и имеет следующий вид:

$$k = Be^{-E/RT}$$

где k — константа скорости реакции; B — предэкспоненциальный множитель; E — энергия активации; R — газовая постоянная; T — температура.

Зная величины B и E, можно вычислить константу скорости при любой температуре. Так как ни одна реакция не может осуществляться, если вступающие в нее вещества не придут в соприкосновение, то в большинстве случаев скорость химических процессов зависит от скоростей, с которыми реагирующие вещества доставляются в зону, где совершаются химические превращения. Скорость протекания всех химических реакций зависит также от величины поверхности раздела (площадь контакта) между реагирующими веществами.

Тепловым эффектом химической реакции Q называется количество теплоты, которое выделяется или поглощается при необратимом протекании реакции. При этом тепловой эффект эндотермической реакции будем считать положительным, а тепловой эффект экзотермической реакции отрицательным.

Теплота изохорного и изобарного процессов приобретает свойства функции состояния, т. е. она не зависит от пути процесса, а зависит только от начального и конечного состояния системы. Это положение было сформулировано Г. И. Гессом. Термохимические расчеты, основанные на законе Гесса, следует выполнять с помощью термохимических уравнений, представляющих собой стехиометрические уравнения химических реакций, дополненные необходимыми сведениями о состоянии реагирующих и образующихся веществ, а также указанием тепловых эффектов.

Тепловой эффект химической реакции при постоянном давлении увеличивается с возрастанием температуры. Это вызвано повышением теплоемкостей продуктов реакции и исходных веществ с учетом стехиометрических коэффициентов. Если теплоемкость во время процесса не меняется, т. е. сумма теплоемкостей продуктов реакции равна сумме теплоемкостей исходных веществ, то тепловой эффект не зависит от температуры.

Потребление и выделение тепла. Для проведения в печах эндотермических реакций или физико-химических

превращений материалов необходимо подводить тепло для следующих целей:

1) нагрева материала до температуры начала реакции или до температуры начала физико-химического превращения (плавления, испарения, термообработки);

2) протекания непосредственно химической реакции или физико-химического превращения.

Эти два вида затрат теплоты можно назвать общей реакционной теплотой, количество ее зависит только от термодинамического состояния материалов и не зависит от теплотехнических процессов. При проведении экзотермических реакций может быть три случая:

1) выделяемого тепла недостаточно для нагрева поступающего материала до температуры начала реакции и компенсации тепловых потерь; в этом случае необходимо дополнительно подводить тепло;

2) выделяемого тепла достаточно только для нагрева поступающего материала до температуры начала реакции и компенсации тепловых потерь; в этом случае реакция протекает только за счет теплоты реакции;

3) выделяемая теплота реакции компенсирует все расходы и избыток тепла необходимо отводить из термореактора для правильного ведения термотехнологического процесса. Это достигается установкой водоохлаждаемых внутренних экранов.

Оптимальные режимы проведения термотехнологических процессов в печах. Наиболее полное и скоростное проведение термотехнологических процессов в печи возможно только при осуществлении их в оптимальных режимах. Оптимальный режим зависит от следующих факторов: химического и гранулометрического состава исходных материалов, теплового и температурного режима проведения процесса, давления в печи (термореакторе), состава и вязкости расплава, шлака, а также от состава и температуры газовой фазы и других показателей.

Химический и гранулометрический состав влияет на скорость и полноту проведения процесса.

Требуемый состав газовой фазы (нейтральная, окислительная или восстановительная) определяет, с каким коэффициентом избытка воздуха должен проводиться процесс при контактировании газовой фазы с твердой или жидкой. При недопустимости контакта обрабатываемого материала с газовой фазой увеличивают температуру за реакционной камерой (ретортой, муфелем) для достижения требуемой температуры проведения процесса.

Тепловой и температурный режимы в печах. Под тепловым режимом в печи понимают условия тепловых нагрузок по времени в соответствии с требованиями термотехнологического процесса. Изменение тепловых нагрузок в печи достигается подводом тепла при эндотермических процессах или отводом тепла при экзотермических.

Выбранный по требованиям термотехнологического процесса профиль температур определяет тепловой режим печи и распределе-

ние температуры в рабочем пространстве по периодам работы. Температурный режим процесса находится во взаимной связи с тепловым и эта зависимость имеет следующие виды:

а) изотермические процессы с постоянным или переменным во времени тепловым режимом;

б) политермические процессы с постоянным или переменным во времени тепловым режимом.

Максимально возможную тепловую нагрузку печи называют ее тепловой мощностью.

Каждый термотехнологический процесс может осуществляться при определенной температуре, которую определяют из термодинамических и теплофизических характеристик исходных материалов и процессов. Однако процесс необходимо стремиться проводить при оптимальном температурном режиме.

Под оптимальным температурным режимом процесса понимают те температурные условия, при которых обеспечивается максимальная производительность по целевому продукту в данной печи. Такой оптимум может быть обеспечен как при изотермическом режиме (t = const), так и при политермическом режиме при изменении температуры во времени для печей периодического действия или по длине для печей непрерывного действия.

Для необратимых химических реакций, протекающих в изотермических условиях, максимально возможная степень превращения не зависит от температуры. Однако скорость реакции, согласно уравнению Аррениуса, возрастает с повышением температуры. Следовательно, максимальная производительность достигается при максимально возможной температуре проведения процесса. Эта оптимальная температура учитывает и условия протекания побочных реакций.

Для обратимых эндотермических реакций повышение температуры приводит к возрастанию степени превращения и к увеличению скорости реакции. Поэтому процесс необходимо осуществлять при максимально возможной температуре.

Для обратимых экзотермических реакций, протекающих в печах непрерывного действия, с повышением температуры возрастает скорость прямой реакции, но при этом снижается максимально достижимая степень превращения. В том месте, где реагенты далеки от состояния химического равновесия, т. е. около входа в печь, целесообразно поддерживать высокую температуру, а около выхода из печи, где реакционная масса приближается по составу к равновесному, температура должна быть пониженной, чтобы сдвинуть процесс в сторону более полного превращения реагентов.

Таким образом, для проведения обратимых экзотермических реакций можно подобрать такой профиль температур в печи, при котором будут обеспечиваться оптимальные условия проведения процесса.

Для того чтобы определить оптимальный профиль температур в печи и максимальную скорость образования целевого продукта, нужно знать состав исходной смеси на входе в печь и зависимость

скорости реакции от температуры. На основании этих данных можно вычислить скорость реакции как функцию температуры и степени превращения и затем представить указанные зависимости графически.

Рациональные рабочие температуры обычно ниже оптимальных для экзотермических процессов и значительно ниже наибольших возможных для эндотермических. Это объясняется тем, что при нагревании реагирующих масс уменьшается разность температур между греющими газами и нагреваемыми реагентами; увеличиваются потери тепла с отходящими теплоносителями (дымовыми газами), а также через стенки печи (термореактора) в окружающую среду. При установлении рабочих температур учитывается спекаемость обрабатываемых материалов, расплавление, испарение, стойкость футеровки печи и другие факторы.

Рабочие температуры для проведения физико-химических превращений материалов определяются из диаграмм состояния их или устанавливаются, исходя из экспериментальных данных.

Горение и взрыв. *Горением* называют химические реакции окисления, сопровождающиеся свечением и значительным выделением тепла; к ним относятся, например, реакции соединения углерода с кислородом, водорода с кислородом или хлором и т. д.

Взрывом называют процесс очень быстрого выделения энергии, связанного с внезапным изменением состояния вещества, в результате чего в среде образуется ударная или взрывная волна. Различают верхнее и нижнее пределы воспламенения, которые зависят от температуры и давления. Верхний предел воспламенения зависит от температуры, природы и количества примесей и мало зависит от формы сосуда, его диаметра и состояния стенок. Нижний предел воспламенения зависит от состава смеси, диаметра сосуда и материала его стенок; от температуры он зависит незначительно.

Тепловое воспламенение возникает при экзотермической реакции и нарушении теплового равновесия, когда выделение тепла при химической реакции становится больше теплоотдачи. При медленном протекании реакции окисления теплота успевает отводиться в окружающее пространство и температура в зоне реакции окисления лишь немного выше температуры окружающей среды. При быстром протекании экзотермических реакций теплота не успевает отводиться в окружающую среду и температура в зоне реакции начинает повышаться. По мере нагревания реагирующих веществ скорость реакции быстро увеличивается, а вместе с этим возрастает и скорость выделения теплоты. Одновременно растет и скорость теплоотдачи, но медленнее, чем скорость выделения теплоты возрастает с повышением температуры по экспоненциальному закону (уравнение Аррениуса). Скорость теплоотдачи растет с повышением температуры линейно, так как тепловой поток прямо пропорционален градиенту температуры. Начиная с некоторой температуры, теплоотдача отстает от теплообразования и реагирующая система саморазогревается, причем этот процесс идет ускоренно. В результате при повышении температуры реакция может закончиться воспламенением и взрывом.

Температура, после достижения которой нарушается тепловое равновесие, называется температурой самовоспламенения; она служит характеристикой жидкого и газообразного топлива.

Температуру воспламенения $T_{\text{воспл}}$ определяют по уравнению

$$T_{\text{воспл}} = \frac{E}{2R}\left(1 - \sqrt{1 - \frac{4R}{E}\,T_0}\right)$$

где E — энергия активации реакции; R — газовая постоянная; T_0 — температура окружающей среды.

Максимальное значение температуры воспламенения $T_{\text{воспл. макс}}$ соответствует условно $T_0 = E/4R$

$$T_{\text{воспл. макс}} = E/2R$$

Если температура окружающей среды $T_0 > E/4R$, то стационарное течение реакции горения невозможно, теплота не будет успевать отводиться в окружающее пространство и произойдут воспламенение и взрыв.

Быстрое повышение температуры при воспламенении и взрыве увеличивает давление газов. Если давление не успевает передаться окружающей среде, то соседние зоны нагреваются до температуры воспламенения и загораются.

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

К теплотехническим процессам, обеспечивающим скоростное и полное проведение термотехнологических процессов, протекающих в печах, необходимо отнести: а) получение тепла; б) теплопередачу; в) движение газов и материалов; г) тепловую работу футеровки.

Тепловая энергия для работы печей

Тепловая энергия, получаемая в печи, должна покрывать ее расходы при работе печей. Тепловая энергия в печах состоит из тепловой энергии, расходуемой непосредственно для проведения химического или физико-химического превращения материалов, и тепловой энергии, компенсирующей потери (с продуктами, отходящими газами и через футеровку). В печах используется тепло, полученное от сжигания топлива и от преобразования электрической энергии в тепловую, и тепло от экзотермических реакций.

Получение тепловой энергии от сжигания топлива. Основным источником тепловой энергии для печей является топливо. Топливом называется вещество, которое при нагревании в присутствии кислорода активно окисляется (сгорает) с выделением значительного количества тепла. Наибольшее значение для промышленных печей имеет углеродистое топливо. Углеродистое топливо бывает твердое, жидкое и газообразное. По происхождению топливо подразделяется на природное и искусственное. Основные разновидности топлива — уголь, нефть и природный газ.

Искусственные топлива: кокс, бензин, керосин, мазут, сжиженные газы и отходящие реакционные газы, содержащие CO.

Таблица 1

Характеристика мазута по ГОСТу 10585—63

Показатель	Нормы по маркам					
	мазут флотский Ф5	мазут флотский Ф12	мазут топочный 40	мазут топочный 100	мазут топочный 200	топливо для мартеновских печей МП
Вязкость условная, °ВУ, не более, при:						
50 °С	5,0	12,0	—	—	—	—
80 °С	—	—	8,0	15,5	—	8,0—16,0
100 °С	—	—	—	—	6,5—9,5	—
Динамическая вязкость, Па·с/см² при:						
10 °С	1,7	—	—	—	—	—
0 °С	2,7	—	—	—	—	—
Зольность, %, не более	0,1	0,1	0,15	0,15	0,3	0,3
Содержание, %, не более:						
механические примеси	0,1	0,15	1,0	2,5	2,5	2,5
вода	1,0	1,0	2,0	2,0	1,0	2,0
сера	2,0	0,8	0,5	Для малосернистого		0,5
			2,0	Для сернистого		
			3,5	Для высокосернистого		
Коксуемость, % не менее	—	—	—	—	—	12
Температура вспышки, °С, не ниже при:						
определении в закрытом тигле	80	90	—	—	—	—
определении в открытом тигле	—	—	90	110	140	110
Температура застывания, °С, не выше	—5	—8	+10	+25	+35	+25
Температура застывания топлива из высокопарафиновых нефтей, °С, не выше	—	—	+25	+42	+42	—
Низшая теплота сгорания в пересчете на сухое топливо, МДж/кг	41,2	41,2	40,5	40,4	40,2	40,4
		Для малосернистого и сернистого				
		40,0	39,7	39,5		
		Для высокосернистого				
Плотность при 20 °С, кг/м³, не более	—	—	—	1,015	—	1,015

Основными свойствами топлива являются: химический состав, отношение к нагреванию, теплотворность, температура горения.

Твердое топливо в печах в настоящее время используется мало и поэтому здесь не рассматривается.

Жидкое топливо и его сжигание. Наиболее распространенным видом жидкого топлива для промышленных печей является мазут, получающийся как остаток после переработки нефти. По ГОСТу 10585—63, мазут выпускают шести марок: Ф5, Ф12, 40, 100, 200 и МП.

Состав и расчетные теплотехнические характеристики (средние данные) топочных мазутов приведены в табл. 1, 2.

На рис. 1 приведена номограмма вязкости мазутов в зависимости от температуры.

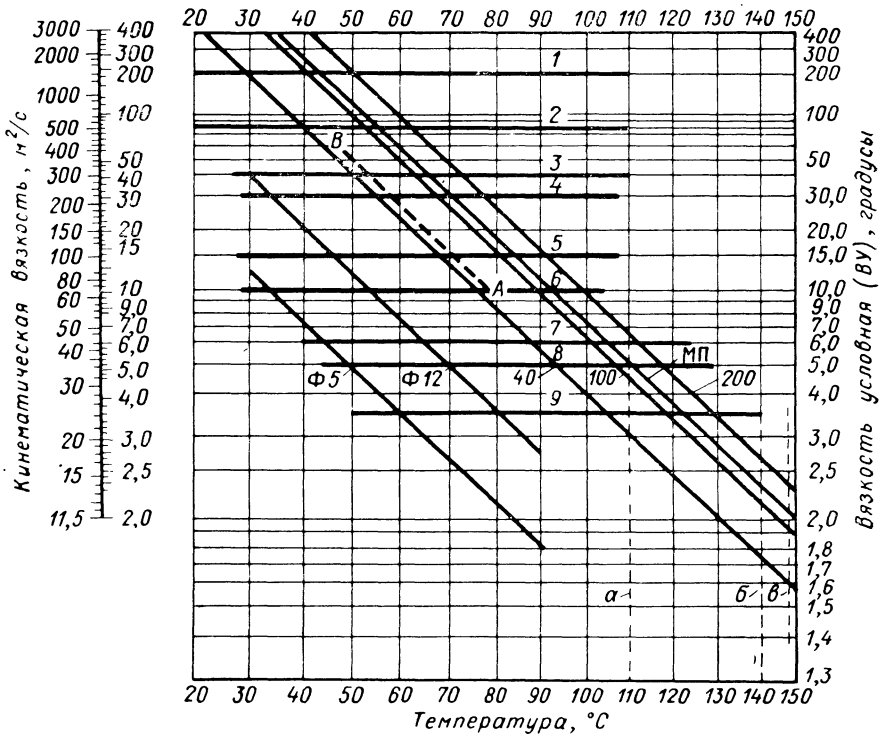


Рис. 1. Номограмма вязкости мазута в зависимости от температуры (с линиями основных эксплуатационных параметров):

1 — максимальная вязкость для винтовых и шестеренчатых насосов; *2* — то же для поршневых и скальчатых насосов; *3* — средняя вязкость для подачи насосами и для слива; *4* — максимальная вязкость для центробежных насосов производительностью 20—40 т/ч; *5* — максимальная вязкость для ротационных и паровых форсунок и в главной циркуляционной системе; *6* — то же для воздушных форсунок высокого давления и для вентиляторных форсунок низкого давления; *7* — предельная вязкость для механических форсунок и рекомендуемая вязкость для паровых форсунок; *8* — рекомендуемая вязкость для воздушных форсунок высокого и низкого давления; *9* — рекомендуемая вязкость для механических форсунок; *а* — максимальная температура мазута в подогревателе (для мазутов с температурой вспышки выше 110 °С); *б* — максимальная температура пара в подогревателе; *в* — температура подогревателя, при которой начинается осаждение углерода на поверхности подогревателя (0,5 мм в месяц).

В расчетах при определении поверхности нагрева змеевиков и расхода тепла на разогрев теплоемкость мазута можно принять равной $C_{ср} = 2$ кДж/(кг·°С).

Коэффициент теплопроводности α можно принять равным 0,13 Вт/(м·°С).

Скрытая теплота плавления мазута равна 170—250 кДж/кг. Оптимальное значение коэффициента избытка воздуха, необходимого для полного сгорания мазута, принимают обычно $\alpha = 1{,}1—1{,}2$.

Мазут	Горючая масса, %				Коэффициент K^r	Характеристика топлива β
	C^r	H^r	S^r	N^r+O^r		
40	87,4	11,2	0,5	0,9	87,58	0,305
100, 200	87,6	10,5	0,7—1	1,0	87,90	0,290
В среднем:						
малосернистый	87,8	10,7	0,7	0,8	88,06	0,285
многосернистый	84,0	11,5	3,5	0,5	85,48	0,320

При тонком распылении, хорошем смесеобразовании и благоприятных условиях в камере горения полное сгорание топлива достигается при $\alpha = 1{,}05—1{,}1$.

Для определения длины факела $L_ф$ (в м) при сжигании мазута может быть использована формула Б. И. Китаева

$$L_ф = 2/w^{0{,}34} d_c^{0{,}83}$$

где w — скорость истечения мазута из сопла, м/с; d_c — диаметр сопла, м.

Газообразное топливо — наилучший вид топлива и перед жидким топливом имеет следующие преимущества: простота регулирования процесса горения при малом избытке воздуха и полном сгорании, возможность высокотемпературного подогрева его и воздуха перед сжиганием; малое содержание минеральной пыли и др.

В печах используют естественный природный газ с большим содержанием метана CH_4. В некоторых установках сжигают сжиженный газ, отходящие реакционные газы от руднотермических, ретортных и доменных печей, а также сланцевые и генераторные газы.

Сжигание природного газа. Основным видом топлива в настоящее время для большинства химических заводов является природный газ. В табл. 3 приведены основные формулы, применяемые для расчетов горения газообразного топлива.

В табл. 4, 5, 6, 7, 8 приведены теплотехнические характеристики различных газов.

Сжигание сжиженных газов. Сжиженные газы являются высококачественным топливом для печей и топок. Целесообразность применения их в печах и топках химической промышленности вызывается отсутствием природного газа на предприятии, а термотехнологический процесс требует использования газообразного топлива. Сжиженные газы используются иногда для опытных, опытно-промышленных установок, где предусматривается переход в дальнейшем на серийный промышленный агрегат на газовом топливе. Характеристики сжиженных газов приведены в табл. 9—11 и на рис. 2.

Таблица 2

Состав и расчетные теплотехнические характеристики топочных мазутов

Теоретически необходимое количество воздуха $L_0^г$, кг/кг	Максимальное содержание в сухих газах RO_2, %	Объем при нормальных условиях		Жаропроизводительность топлива, °С
		сухие газы $V_{с.г}^{мин}$ при $\alpha=1$, м³/кг	водяные пары в продуктах сгорания $V_{в.п}$ при $\alpha=1$, м³/кг	
13,90	16,00	10,18	1,42	2080
13,70	16,20	10,06	1,35	2090
13,80	16,30	10,00	1,40	2090
13,80	15,80	10,00	1,40	2050

Наиболее подходящими углеводородами, отвечающими требованиям, предъявляемым ГОСТом 7459—55 к сжиженным газам, являются пропан и бутан.

Сжиженные газы в большинстве случаев представляют собой смесь пропана и бутана и небольшие количества изобутана, этана, непредельных углеводородов и других примесей. Содержание пропана и бутана в смеси определяется требованиями эксплуатационных условий.

Получение тепловой энергии от преобразования электрической энергии. Нагрев по методу сопротивления основан на физическом свойстве твердых и жидких проводников преобразовывать электрическую энергию в тепловую в тех случаях, когда они непосредственно включаются в цепь электрического тока.

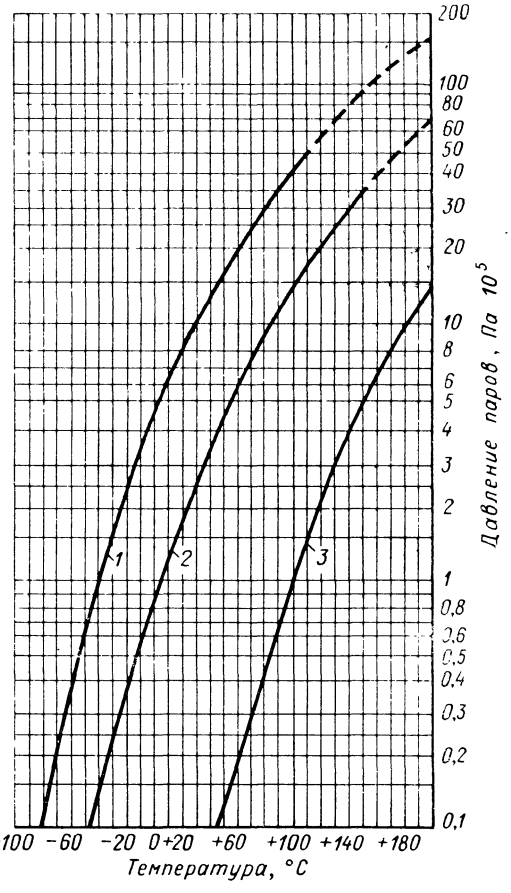


Рис. 2. Зависимость давления паров сжиженных газов от температуры:
1 — пропан; *2* — бутан; *3* — вода.

Таблица 3

Основные формулы, применяемые для расчетов горения газообразного топлива

Определяемая величина	Формула	Величины, входящие в формулу
Теплота сгорания сухого газа, высшая, кДж/м³	$Q_{в}^{с}=4{,}186\,(30{,}5H_2+30{,}2CO+95CH_4+166C_2H_6+236{,}9C_3H_8+307C_4H_{10}+377{,}2C_5H_{12}+150{,}4C_2H_4+219{,}4C_3H_6+290C_4H_8+359{,}8C_5H_{10})$	H_2, CO, CH_4 и т. д.— объемные доли компонентов, входящих в смесь газов, %
Теплота сгорания сухого газа, низшая, кДж/м³	$Q_{н}^{с}=4{,}186\,(25{,}8H_2+30{,}2CO+85{,}5CH_4+152{,}3C_2H_6+218C_3H_8+283{,}4C_4H_{10}+348{,}9C_5H_{12}+141{,}1C_2H_4+205{,}4C_3H_6+271{,}1C_4H_8+336{,}5C_5H_{10})$	То же
Соотношения между высшей и низшей теплотами сгорания	$Q_{н}^{п}=Q_{в}^{р}-4{,}83\,[H_2+2CH_4+2C_2H_4+3C_2H_6+4C_3H_8+H_2S+H_2O]$	То же
Теплота сгорания влажного газа низшая при давлении и температуре, отличных от нормальных, кДж/м³	$Q_{р}^{н}=\left\{Q_{в}^{с}\frac{PT_0}{760T}\times\left[1-\frac{\varphi P_с}{P}\times\left(1+\frac{18\,600}{22{,}4Q_{н}^{с}}\right)\right]\right\}4{,}186$	$Q_{н}^{с}$ — теплота сгорания низшая, кДж/м³; $P_с$ — давление насыщенного пара, Па; φ — относительная влажность; T_0 — 273 К
Количество воздуха теоретически необходимого для сгорания, м³/м³	$\alpha_0=0{,}0476\,[0{,}5H_2-0{,}5CO+2CH_4+3C_2H_4+3{,}5C_2H_6+4{,}5C_3H_6+5C_3H_8+6C_4H_8+6{,}5C_4H_{10}+8C_5H_{12}+1{,}5H_2S-O_2]$	
Объем продуктов сгорания газа при теоретическом количестве воздуха, м³/м³	$V_{п.\,г}=V_{CO_2}+V_{H_2O}+V_{N_2}$	V_{CO_2}; V_{H_2O}; V_{N_2} — объемы отдельных компонентов в продуктах сгорания 1 м³ горючего газа, м³
Объем углекислого газа в продуктах сгорания газа, м³/м³	$V_{CO_2}=0{,}01\,[CO_2+CO+CH_4+2C_2H_6+\ldots+mC_mH_n]$	—
Объем водяных паров в продуктах сгорания газа, м³/м³	$V_{H_2O}=0{,}01\,[H_2+2CH_4+2C_2H_4+\ldots+\frac{n}{2}C_mH_n+0{,}124(d_г+\alpha_0 d_в)]$	$d_г$ и $d_в$ — влажность горючего газа и воздуха, г/м³

Продолжение табл. 3

Определяемая величина	Формула	Величины, входящие в формулу
Объем азота в продуктах сгорания газа, м³/м³	$V_{N_2} = 0{,}79\alpha_0 + 0{,}01N_2$	—
Средняя объемная теплоемкость смеси газов, кДж/(м³ · °С)	$C_{см} = \left(\frac{V_1C_1 + V_2C_2}{100} + \frac{V_3C_3 + \ldots + V_nC_n}{100}\right) \times 4{,}186$	V_1; V_2; $V_3, \ldots V_n$ — содержание отдельных компонентов смеси, объемн. %; C_1; C_2; C_3; ... C_n — средняя объемная теплоемкость отдельных компонентов смеси, кДж/(м³ · °С);
Пределы воспламенения смеси газов, верхний или нижний (приближению, при незначительном содержании балластных примесей), объемн. % газовоздушной смеси	$L = \frac{V_1 + V_2 + \ldots + V_n}{\frac{V_1}{e_1} + \frac{V_2}{e_2} + \ldots + \frac{V_n}{e_n}}$	V_1, V_2 ... V_n — содержание отдельных горючих компонентов газовой смеси, объемн. %; e_1, e_2 ... e_n — содержание отдельных горючих компонентов газовой смеси соответственно при верхнем или нижнем пределах воспламенения, объемн. %;
Максимальная скорость распространения пламени горючей газовой смеси, м/с	$v_{см.\ макс} = L_м \times \left(\frac{V_1 v_{макс_1}}{e_1} + \frac{V_2 v_{макс_2}}{e_2} + \ldots + \frac{V_n v_{макс_n}}{e_n}\right)$	$L_м$ — содержание сложного газа в смеси, дающей максимальную скорость распространения пламени, объемн. %; $v_{макс_1}$, $v_{макс_2}$, ... $v_{макс_n}$ — максимальная скорость распространения пламени отдельных газов, м/с; e_1, e_2, ... e_n — содержание отдельных газов в смеси, дающее $v_{см\ макс}$

Таблица 4

Характеристика горения некоторых простых газов

Газ	Реакция	Тепловой эффект реакции при 0 °С, кДж/м³	
		$Q_в$	$Q_н$
Водород	$H_2 + 0{,}5O_2 = H_2O$	12 760	10 810
Окись углерода	$CO + 0{,}5O_2 = CO_2$	12 680	12 680
Метан	$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$	39 792	35 741
Ацетилен	$C_2H_2 + 2{,}5O_2 = 2CO_2 + H_2O$	58 052	58 052
Этилен	$C_2H_4 + 3O_2 = 2CO_2 + 2H_2O$	63 047	59 108
Этан	$C_2H_6 + 3{,}5O_2 = 2CO_2 + 3H_2O$	69 713	63 797
Пропан	$C_3H_8 + 5O_2 = 3CO_2 + 4H_2O$	99 219	91 321
Бутан	$C_4H_{10} + 6{,}5O_2 = 4CO_2 + 5H_2O$	128 608	118 736
Сероводород	$H_2S + 1{,}5O_2 = SO_2 + H_2O$	25 425	23 401

Таблица 5

Состав и характеристика основных видов газового топлива

	Состав сухого газа *, объемн. %							$Q_н^р$, кДж/м³	Удельная масса, кг/м³
	N_2	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_mH_n	CO_2		
Природные газы газовых месторождений:									
Аргединского	3,10	95,50	1,00	0,20	0,10	Следы	0,1	35 164	0,78
Газлинского	0,13	98,07	1,60	0,03	0,05	0,05	0,12	36 182	0,73
Дашавского	1,03	98,03	0,30	0,12	0,15	0,15	0,10	35 659	0,73
Елшанского	3,3	94,00	1,20	0,70	0,40	0,20	0,20	35 998	0,75
Ставропольского	0,7	98,70	0,30	0,12	0,06	0,06	0,12	35 550	0,73
Песчано-Уметского	3,0	94,10	0,60	0,30	0,20	0,70	1,10	35 621	0,78
Соколово-Горского	3,0	90,60	1,30	0,70	0,50	1,10	2,80	36 153	0,82
Саушинского	1,50	97,80	0,40	0,15	0,15	0,15	0,15	35 471	0,73
Линевского	3,1	91,80	3,0	1,00	0,40	0,50	0,20	36 940	0,79
Шебелинского	0.80	93,40	3,50	0,90	0,61	0,70	0,09	43 258	0.60
Природные газы нефтяных месторождений:									
Азнефтедобычи	—	85,00	2,80	—	1,20	—	11,0	33 662	0.89
Грознефти	3,00	49,00	11,00	17,00	15,00	4,00	1,0	63 681	1,41
Дагестаннефти	4,00	75,00	6,80	6,00	6,00	0,20	2,0	44 254	1,00
Прикамнефти	30,00	51,00	6,00	8,00	4,00	0,30	0.7	34 562	1,11
Бугурусланнефти	12,00	71,70	7,00	4,00	3,00	1,50	0,8	40 026	0,98
Мухановского	5,2	42,7	20,0	19,5	9,5	—	0,2	61 325	1.29
Печной газ** (от фосфорных печей)	5,15	—	—	—	—	—	—	11 920	1,2

* Газы не содержат H_2, CO и O_2.
** Этот газ содержит H_2 — 1,03% и CO — 92,7%.

Нагрев электрической дугой основан на преобразовании электрической энергии в тепловую в электрической дуге преимущественно в газовом пространстве, разделяющем электроды, и на концах электродов.

По способу передачи тепловой энергии в дуговых печах различаются следующие виды нагрева:

а) прямой, когда дуга горит между электродом и расплавленным материалом;

б) косвенный, когда дуга горит между двумя электродами, а расплав находится на некотором расстоянии от дуги. При этом передача тепловой энергии в расплав происходит преимущественно в результате излучения;

в) комбинированный или смешанный, когда электрическая дуга создается между шихтой и погруженным в твердую или расплавленную шихту электродом. В этом случае выделяемая в шихте тепловая энергия слагается из двух составляющих: тепловой энергии, выделяемой непосредственно в загрузке, и тепловой энергии, выделяемой в электрической дуге, горящей между электродом и нагретой шихтой;

Таблица 6

Теплотехнические характеристики различных газов

Газ	Теоретический расход воздуха для сжигания 1 м³ газа, м³/м³	Теоретический объем продуктов сгорания 1 м³ газа, м³/м³	Температура сгорания без учета влаги воздуха, °С	Максимальное содержание CO_2 в сухих продуктах сгорания, объемн. %
Природные газы газовых месторождений:				
Ставропольского . . .	9,450	10,591	2030	11,8
Елшанского	9,520	10,714	2030	11,8
Дашавского	0,460	10,617	2035	11,8
Газлинского	9,601	10,775	2050	11,8
Шебелинского	11,430	12,773	2060	11,8
Саушинского	9,420	10,365	2030	11,8
Линевского	9,810	11,005	2030	11,8
Природные газы нефтяных месторождений:				
Туймазинского	12,300	13,895	2175	13,2
Мухановского	16,100	17,600	2080	13,2
Ромашкинского . . .	15,600	17,100	2080	13,2
Шугуровского	9,350	10,779	2190	12,6
Печной газ	2,26	2,852	2280	—

Таблица 7

Температура воспламенения и пределы взрываемости смесей различных газов с воздухом

Газ	Температура воспламенения, °С	Предел взрываемости смесей при стандартных физических условиях, объемн. %		Присадка балластного газа, исключающая зажигание смеси, объемн. %			
				азота		углекислого газа	
		нижний	верхний	в газе	в воздухе	в газе	в воздухе
Водород	530—590	4,0	74,2	94,3	75,0	91,1	61,0
Окись углерода	610—658	12,5	74,2	80,0	68,0	68,0	53,0
Метан	654—690	5,0	15,0	86,0	38,0	77,0	24,0
Этан	530—594	3,2	12,5	93,0	46,0	88,0	33,0
Пропан	530—588	2,4	9,5	93,7	43,0	89,0	30,0
Бутан	490—569	1,9	8,4	94,5	41,0	90,3	28,0
Этилен	540—550	2,8	28,6	94,0	50,0	90,5	41,0
Природный	530	4,5	13,5	—	—	—	—
Доменный	530	35,0	75,0	—	—	—	—
Коксовый	300—500	7,0	21,0	—	—	—	—
Сланцевый	700	6,1	35,0	—	—	—	—

Таблица 8

Скорости распространения пламени
(газ в смеси с воздухом при стандартных физических условиях)

Газ	При стехиометрическом соотношении		В смесях с максимальной скоростью распространения	
	содержание газа, объемн. %	скорость, м/с	содержание газа, объемн. %	скорость, м/с
Водород	29,50	1,60—1,80	42,0—43,0	2,67—2,65
Окись углерода	29,50	0,28—0,30	43,0—52,5	0,41—0,46
Метан	9,51	0,34—0,37	9,5—10,5	0,37—0,38
Пропан	4,03	0,41	4,3	0,43
Ацетилен	7,75	1,00—1,28	10,0—10,7	1,31—1,57
Этилен	6,54	0,60—0,63	7,0—7,4	0,63—0,81

Таблица 9

Физические и химические свойства компонентов сжиженных газов

Характеристика	Компоненты	
	пропан	бутан
Химическая формула	C_3H_8	C_4H_{10}
Молекулярная масса	44,095	58,121
Состав, %:		
H	18,30	17,35
C	81,70	82,65
Относительная удельная масса газа	1,562	2,091
Удельная масса газа γ, кг/м³	2,019	2,703
Удельная масса жидкости $\gamma_ж$ при $t_{кип}$ и $1{,}01325 \cdot 10^5$ Па	585	600
Удельная газовая постоянная, кгм/(кг · °С)	19,25	14,59
$t_{кип}$ при $1{,}01325 \cdot 10^5$ Па, °С	42,1	0,6
$t_{отв}$, °С	189,9	135,0
$t_{кр}$, °С	96,81	152,0
Критическое давление, Па	$42{,}6578 \cdot 10^5$	$349\,571 \cdot 10^5$
Теплоемкость при постоянном давлении C_p, кДж/(кг · °С)	1,66	1,7
Теплоемкость при 0 °С и постоянном объеме C_v, кДж/(кг · °С)	1,4579	1,5521
Показатель адиабаты при 0 °С и $1{,}01325 \cdot 10^5$ Па	1,138	1,144
Низшая теплота сгорания газа:		
кДж/кг	45928,9	45 397
кДж/м³	91,2338	11 862
Низшая теплота сгорания жидкостей, кДж/м³	24 672 284	28 141 914
Скрытая теплота испарения при $1{,}01325 \times 10^5$ Па:		
кДж/кг	426,97	390,55
кДж/л	219,34	228,97

Продолжение табл. 9

Характеристика	Компоненты	
	пропан	бутан
Объем паров 1 кг сжигаемого газа при 0 °С и $1{,}01325 \cdot 10^5$ Па, м³	0,51	0,386
Объем паров с 1 л сжиженного газа при 0 °С и $1{,}01325 \cdot 10^5$ Па, м³	0,269	0,235
Теоретически необходимое для сгорания газа количество воздуха, м³/м	23,8	30,94
То же кислорода, м³/м³	5,0	6.5
Объем продуктов сгорания, м³/м³:		
CO_2	3,0	4,0
H_2O	4,0	5,0
N_2	18,8	24,44
Всего	25,8	93,44
Жаропроизводительность, °С	2155	2130
Температура воспламенения, °С	510/580	475/550
Октановое число	120	93
Пределы воспламеняемости горючих газов в смеси с воздухом при 0 °С и $1{,}01325 \cdot 10^5$ Па (нижний) верхний предел воспламенения, %	2,3/9,5	1,5/8,4
То же с кислородом, %	2,0/55	1,3/47
Максимальная скорость распространения пламени в трубе ∅ 25,4 мм, м/с	0,821	0,826
Коэффициент теплопроводности парообразных компонентов $\lambda_г$, Вт/(м · °С)	0,01478	0,0135
Коэффициент теплопроводности жидких компонентов λ, Вт/(м · °С)	0,127	0,132
Отношение объема газа к объему жидкости при $t_{кип}$ и $1{,}01325 \cdot 10^5$ Па	272	237

Таблица 10

Удельная теплоемкость жидкого пропана и бутана

Газ	Температура, °С	Теплоемкость, кДж/(кг · °С)	Газ	Температура, °С	Теплоемкость, кДж/(кг · °С)
Пропан	—42,1	2,227	Бутан	—23,1	2,198
	0,0	2,344		11.3	2,231
	+20,0	2,512		0,0	2,281
	+40,0	2,679		+20,0	2,428
				+40,0	2,574

г) нагрев в дуговых плазмотронах, когда нагреваемый материал помещается в потоке низкотемпературной плазмы (десятки тысяч К).

Нагрев индукционным методом. С помощью этого метода могут быть расплавлены главным образом электропроводящие материалы. При этом выделение тепловой энергии происходит с помощью индуктированных токов в расплавленном металле, т. е. методом сопротивления.

Таблица 11

Скрытая теплота испарения пропана и бутана (в кДж/кг)

Температура, °С	Пропан	Бутан	Температура, °С	Пропан	Бутан
—35	415,3	—	+ 5	371.7	380,5
—30	410,2	—	+10	364,2	376,3
—25	403,5	—	+15	356,2	371,7
—20	400,6	—	+20	347,8	367 5
—15	396,0	397.3	+25	339,06	362,08
—10	387,6	393,06	+30	329,01	357.9
— 5	382,18	388,9	+35	320,2	352,87
0	378,8	384,7			

Теплопередача

Для проведения термотехнологического процесса в печах необходимо подвести тепло к материалам, находящимся в термореакторе или рабочей камере при эндотермических реакциях, или отвести тепло от материалов при экзотермических реакциях.

В теплопередаче исследуются законы, связанные с переходом тепла от одних тел к другим и распределением температур, которое происходит в результате теплообмена между телами. Теплообмен является одним из основных процессов в работе печей.

Различают три вида передачи тепла: теплопроводность, конвекцию и тепловое излучение. В реальной печи передача тепла осуществляется практически всеми видами или в любой комбинации.

Теплопроводность — передача тепла от одних частей тела к другим, обусловленная разностью температур, без заметного перемещения частиц. С физической точки зрения — это передача кинетической энергии одних молекул другим.

Теплопроводностью передается тепло только материалу через муфели в сульфатсоляных, вращающихся и ретортных печах и отнимается тепло из реакторов печей синтеза хлорида натрия. Из-за теплопроводности футеровки печи теряется часть тепла из реактора или рабочей камеры.

Общее количество тепла Q (в Вт), проходящее через однослойную стенку при стационарном режиме, определяется по уравнению Ньютона:

$$Q = \frac{\lambda}{\delta}(t_1 - t_2) F\tau$$

где λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С); δ — толщина стенки, м; t_1, t_2 — температура на внутренней и наружной стенке, °С; F — поверхность теплопередачи, м²; τ — время теплопередачи.

Для многослойной стенки эта формула имеет следующий вид:

$$Q = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_i}{\lambda_i}}(t_1 - t_2) F\tau$$

Для цилиндрической многослойной стенки используют следующее выражение:

$$Q = \frac{2{,}73\,(t_{вн} - t_{нар})\,L\tau}{\frac{1}{\lambda_1}\lg\frac{D_2}{D_1} + \frac{1}{\lambda_2}\lg\frac{D_3}{D_2} + \frac{1}{\lambda_3}\lg\frac{D_4}{D_3} + \ldots}$$

где $t_{вн}$ и $t_{нар}$ — температуры внутри и снаружи цилиндра, С°; L — длина цилиндра, м; D_1, D_2, D_3, D_4 — диаметры окружностей, ограничивающих отдельный слой, м (начиная от центра).

Для проведения технических расчетов теплопроводности при нагреве и охлаждении тел при нестационарном режиме необходимо задаться следующими краевыми и упрощающими условиями:

1) температурное поле одномерно, т. е. $t = f(xr)$;

2) геометрические формы тела элементарно просты и представлены бесконечной пластиной, бесконечной длины цилиндром, шаром, нагреваемыми симметрично;

3) физические свойства тела, c, ρ, λ, a не зависят от температуры;

4) все точки тела в начале нагрева (охлаждения) имеют одинаковые температуры;

5) газовая или жидкая среда, в которой тела нагреваются или охлаждаются, имеют во всех точках одинаковую и постоянную во времени температуру t_1;

6) коэффициент теплоотдачи α между средой и телом постоянны во времени;

7) тела нагреваются или охлаждаются одновременно со всех сторон (двусторонний нагрев).

При этих условиях можно решить следующие задачи по нагреву и охлаждению тел:

а) определить значения температуры на поверхности и в середине пластины и цилиндра после их нагрева (охлаждения) за время τ, ч;

б) определить значения времени τ, необходимого для нагрева (охлаждения) пластины или цилиндра до требуемой температуры;

в) определить количество тепла, переданного телу за время нагрева τ.

Общее дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье — Кирхгофа имеет следующий вид:

$$\frac{Dt}{D\tau} = \frac{\lambda}{c\rho}\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}\right) = a\nabla^2 t$$

где $\frac{\lambda}{c\rho} = a$ — коэффициент температуропроводности, м²/ч; $\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}\right) = \nabla^2 t$ — оператор Лапласа для переменной t.

При указанных выше условиях решение дифференциального уравнения теплопроводности привело к формуле в виде критериальных уравнений:

$$\frac{t_г - t_{кон}^{пов}}{t_г - t_{нач}^{пов}} = f_1(Bi;\ Fo)$$

$$\frac{t_г - t_{кон}^{ср}}{t_г - t_{нач}^{ср}} = f_2(Bi;\ Fo)$$

$$\frac{Q_{пер}}{Q_{нач}} = f_3(Bi;\ Fo)$$

В этих формулах: $t_г$ — постоянная температура среды, окружающей тело, °С; $t_{нач}^{пов}$, $t_{кон}^{пов}$ — конечная и начальная температуры поверхности нагреваемого (охлаждаемого) тела, °С; $t_{кон}^{ср}$, $t_{нач}^{ср}$ — конечная и начальная температуры середины тела, °С; $\frac{t_г - t_{кон}^{пов}}{t_г - t_{нач}^{пов}}$ и $\frac{t_г - t_{кон}^{ср}}{t_г - t_{нач}^{ср}}$ — безразмерная температура на поверхности и в середине тела (температурный критерий); $Q_{пер}$ — количество тепла, переданное телу за время нагрева (охлаждения), кДж; $Q_{нач}$ — количество тепла (в кДж), содержащееся в теле в начале нагрева; за начальную температуру тела условно принимается разность температур окружающей среды и действительной начальной температуры тела, т. е. $(t_г - t_{нач}^{тела})$; Bi — критерий Био, характеризующий отношение внутреннего теплового сопротивления тела к внешнему; Fo — критерий Фурье; $f_1(Bi;\ Fo)$ — функции от критериев Bi и Fo; $f_2(Bi;\ Fo)$ и $f_3(Bi;\ Fo)$ определяются при помощи графиков, приводимых в справочниках по теплопередаче.

Конвективный теплообмен между газом или жидкостью и твердым телом происходит в результате их соприкосновения. Теплопередача при этом происходит переносом теплоты движущимися материальными частицами газа или жидкости, прилегающей к поверхности твердого тела при эндотермических реакциях, и от частиц материала к газу или жидкости при экзотермических реакциях, за исключением печи синтеза хлористого водорода, где тепло от реакционных газов передается металлическому кожуху печи и отводится из системы.

Количество тепла, переданное конвекцией при стационарном режиме, может быть определено по формуле:

$$Q = \alpha_к (t_1 - t_2) F\tau$$

где Q — количество тепла, переданное теплоносителям Вт; $\alpha_к$ — коэффициент теплоотдачи конвекцией Вт/(м^2·°С); t_1 — температура

теплоносителя, °С; t_2 — температура теплоприемника, °С; F — поверхность теплообмена, м²; τ — время теплообмена, ч.

Коэффициент теплоотдачи $\alpha_к$ зависит от формы теплоприемника, размеров поверхности нагрева или теплоотдачи, температуры теплоносителя и теплоприемника; скоростей движения теплоносителя, коэффициента теплопроводности газа, жидкости, теплоемкости теплоносителя, вязкости газов и т. д.

На теплообмен конвекций существенное влияние оказывает режим работы печи. Режимы бывают следующие:

а) плотный, когда движение твердых мелкокусковых материалов в слое в результате перегревания и пересыпания — основной процесс для многоподовых печей с вращающимся барабаном, сульфатсоляных и глетных печей;

б) плотный — фильтрующийся — основной процесс для известковообжигательных, фосфоритообжигательных шахтных печей;

в) кипящий слой (псевдоожиженный);

г) взвешенный слой (псевдогазовый).

Теплообмен излучением. Излучение происходит при квантовом переходе атомов и молекул из стационарных состояний с большей энергией в стационарные состояния с меньшей энергией. Для непрерывного излучения тело должно получать энергию извне. Так как переходы атомов и молекул из одного состояния в другое носят различный характер, излучение испускается с различными длинами волн.

Тепловое излучение является одним из видов электромагнитных колебаний с длиной волн от 0,4 до 40 мкм.

Теплоотдача излучением в промышленных печах играет доминирующую роль.

Мощность излучения Q, проходящего через какую-либо поверхность, называется *лучистым потоком*, а мощность, излучаемая элементом поверхности в полупространстве, называется *полусферическим лучистым потоком.*

Мощность излучения, отнесенная к единице поверхности излучателя, называется *плотностью излучения* (в Вт/м²):

$$E = dQ/dF$$

Спектральную плотность излучения, отнесенную к рассматриваемому интервалу длин волн, называют *полусферической интенсивностью излучения* и она показывает, насколько велика мощность излучения (в Вт/м³) при данной длине волны:

$$B = dE_\lambda/d\lambda$$

Если на тело падает мощный поток $Q_{пад}$, то в общем случае часть его $Q_{погл}$ поглощается, часть $Q_{отраж}$ отражается и часть $Q_{пр}$ пропускается сквозь тело:

$$Q_{пад} = Q_{погл} + Q_{отраж} + Q_{пр}$$

Если это уравнение разделить на $Q_{пад}$, получим

$$\frac{Q_{погл}}{Q_{пад}} + \frac{Q_{отраж}}{Q_{пад}} + \frac{Q_{пр}}{Q_{пад}} = 1$$

или

$$a + r + d = 1$$

Безразмерные параметры a, r и d называются соответственно поглощательной, отражательной и пропускательной способностью.

Если $a = 1$ (следовательно, $r = d = 0$), то весь падающий поток полностью поглощается телом. Такое тело называется абсолютно черным или сокращенно черным. Если $r = 1$ (следовательно, $a = d = 0$), то весь падающий поток полностью отражается телом. Если каждый луч рассеивается, т. е. отражается по всем направлениям, то такое отражение называется диффузным, а тело — абсолютно белым. Если $d = 1$ (следовательно, $a = r = 0$), то тело называется абсолютно прозрачным или диатермичным.

Отношение плотности излучения данного тела к плотности излучения абсолютно черного тела той же температуры называется степенью черноты: $\varepsilon = E/E_0$.

Основными законами, раскрывающими теплопередачу радиацией, являются:

1. Закон Кирхгофа устанавливает, что отношение излучательной способности E к поглощательной a для всех серых тел одинаково и равно излучательной способности абсолютно черного тела E_0 при той же температуре и зависит только от температуры.

Математическое выражение закона Кирхгофа представляется уравнением:

$$\frac{E}{\varepsilon} = E_0 \quad \text{или} \quad \frac{E}{a} = E_0 = f(T)$$

2. Закон Планка — устанавливает для абсолютно черного тела изменение интенсивности или плотности теплового излучения по длинам волн и выражается следующим уравнением:

$$E^{\circ}_{\lambda T} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c/\lambda T - 1}}$$

где $E^{\circ}_{\lambda T}$ — интенсивность или плотность монохроматического излучения абсолютно черного тела для длины волны λ и температуры T, Вт/(м^2·мкм); λ — длина волны излучения, мкм; T — абсолютная температура тела, К; c_1 — постоянная, равная $3{,}745 \cdot 10^{-16}$ Вт·м^2; c_2 — постоянная, равная $1{,}44 \cdot 10^{-2}$ м; e — основание натуральных логарифмов.

3. Закон Вика (закон смещения) устанавливает, что произведение длины волны максимального излучения $\lambda_{макс}$ на абсолютную температуру T — величина постоянная и выражается уравнением: $\lambda_{макс} T = 2884$ мкм.

4. Закон Стефана — Больцмана (закон четвертых степеней) устанавливает, что энергия полного теплового излучения E пропор-

циональна четвертой степени абсолютной температуры T. Для технических расчетов уравнение имеет следующий вид:

$$E = c\left(\frac{T}{100}\right)^4$$

где c — коэффициент лучеиспускания тела, Вт/(м^2·К^4).

5. Закон Ломберта (закон косинусов) устанавливает, что количество энергии dQ_φ, излучаемое элементом поверхности dF_1 в направлении dF_2, пропорционально количеству энергии, излучаемой по нормали E_n, умноженному на величину пространственного угла $d\Omega$ и $\cos\varphi$, т. е.

$$dQ\varphi = E_n\, d\Omega \cos\varphi\, dF$$

6. Закон Келлера (закон квадратов расстояний) устанавливает, что облучательная способность точечного источника излучения обратно пропорциональна квадрату расстояний между источником и облучаемым телом.

В общем виде количество энергии dQ, падающей на облучаемую площадку dF от точечного источника, будет равно:

$$dQ = \frac{W}{4\pi r^2}\cos\varphi\, dF$$

где W — количество энергии, излучаемой источником равномерно во все стороны, Вт; r — расстояние от источника до площадки dF, м; φ — угол между направлением r и нормалью к облучаемой площадке, град.

При увеличении размеров источника излучения закон Келлера теряет свою силу.

Общая формула теплообмена излучением между двумя непрозрачными телами, написанная на основании закона Стефана — Больцмана, имеет вид:

$$Q = \varepsilon_n c_0 \varphi_{обл}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] F_{расч}\tau$$

где Q — количество тепла, переданное излучением от первого тела ко второму, кДж; ε_n — приведенная степень черноты системы, учитывающая степень черноты обоих тел и их взаимное расположение; c_0 — коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела, Вт/(м^2·К^4); $\varphi_{обл}$ — средний угловой коэффициент или коэффициент облученности, учитывающий форму, размеры и взаимное расположение поверхностей; T_1 и T_2 — абсолютные температуры первого и второго тела, К; F — условная расчетная поверхность теплообмена, м^2; τ — время теплообмена, ч.

Движение газов и материалов в печи

При проведении в печах термотехнологических процессов, связанных с химическими превращениями, образуется большое количество горячих газов. Движение газов в реакционном пространстве печи и газоходах существенно влияет на ход технологического

процесса, горение топлива, теплопередачу к перерабатываемым материалам и на движение твердых и жидких веществ.

Естественное движение газов в реакционном пространстве печи осуществляется вследствие теплового расширения газов за счет тепловой энергии топлива или тепла, выделяющегося в процессе экзотермической реакции. В большинстве современных печей движение газов создается принудительно дымососами или вентиляторами с затратой механической или электрической энергии. Преодоление сопротивлений от трения газов о стенки, местных сопротивлений на пути движения газов и дополнительных сопротивлений, возникающих при движении газов через слой кускового материала, осуществляется потенциальной и кинетической энергией движущихся газов.

Характер движения газов бывает ламинарный или турбулентный, что имеет очень важное значение для расчета критических скоростей псевдоожижения в печах с кипящим слоем.

Движение газов в свободном реакционном пространстве печи осуществляется в виде отдельных потоков или струй. В зависимости от условий движения различают следующие виды струи: свободную затопленную; свободную незатопленную, несвободную или ограниченную; струю, образующуюся из нескольких отдельных струй.

В аппаратах и в ряде печей с погружными горелками газы движутся через жидкие, расплавленные массы шлаков, штейнов с помощью поверхностного или погружного дутья.

Движение твердых и жидких материалов в процессе термотехнологического процесса в вращающихся, руднотермических, шахтных, ретортных имеют существенное влияние на скорость и полноту протекания процесса переработки, так как от движения материалов зависит величина активной реакционной поверхности, теплообмен, унос пыли и т. п.

В печах с вращающимся барабаном, шахтных и ретортных движение твердых мелкокусковых материалов в слое в результате перегребания или пересыпания является основным процессом.

В печах, где термотехнологические процессы протекают в кипящем слое твердых материалов, движение их в слое, через который проходят нагретые газы, является основным.

В вихревых печах движение мелких материалов, вследствие увлечения их газовыми потоками, является очень важным процессом.

Очень важным для равномерного нагрева в фосфорных, карбидных, хлорбариевых и других печах является движение расплава в реакторе (ванне).

Тепловая работа футеровки

Футеровка печи выполняет теплотехнические, технологические и строительные функции. В печах, где проводятся химические превращения, футеровка является высокотемпературным реактором или устройством для ограждения рабочего пространства от окружающей атмосферы. Внутренняя поверхность футеровки в печах некоторых типов участвует в теплообменных процессах, а в некоторых является только ограждающим устройством. Так, в отражатель-

ных, стекловареных, мартеновских, нагревательных кузнечных и термических печах футеровка имеет исключительно значение в теплообмене излучением. В печах с вращающимся барабаном при наружном обогреве, муфельных сульфатсоляных и глетных печах, ретортных печах футеровка непосредственно участвует в теплообмене теплопроводностью совместно с излучением.

От выбора материала футеровки и от ее толщины существенно зависит количество переданного тепла материалу, его температура, а также к. п. д. печи.

В печах многоподовых, многокамерных с кипящими слоями футеровка подины участвует в теплообмене радиацией и одновременно является ограждающим устройством зон с различными температурами. В печах руднотермических дуговых футеровка подины непосредственно участвует в передаче электроэнергии.

В печах, где протекают экзотермические реакции, через футеровку отводится часть тепла в окружающую атмосферу, что создает благоприятные условия протекания термотехнологического процесса. В печах для сжигания серы и обжига колчедана футеровка является стабилизирующим устройством при горении их. В шахтных печах известковообжигательных, фосфоритообжигательных футеровка является только ограждающим устройством и мало участвует в теплообмене.

Во всех печах через футеровку теряется значительная часть тепла из реакционного пространства и поэтому футеровке печей должно быть уделено существенное внимание.

Выбор материала футеровки и определение ее толщины подробно изложены в главе IV.

Глава II

ПЕЧИ

КЛАССИФИКАЦИЯ ПЕЧЕЙ

В настоящее время используется много разнообразных по типу и классификации печей, возникших не только в самой химической промышленности, но и заимствованных из других отраслей промышленности.

Печи химической промышленности можно классифицировать по многим признакам: по производственным и конструктивным особенностям, по способу подвода тепла и т. д.

Автором предлагается классификация печей химической промышленности, в основе которой лежит производственная принадлежность (печи производства фосфора, печи производства карбида и т. д.).

В состав каждой производственной группы входят печи различных типов как по целевому назначению, так и по способам подвода тепла и по конструкции. Поэтому печи каждой производственной группы классифицируются по их технологическому назначению, а затем по теплотехническим особенностям.

Последним этапом классификации является подразделение печей по конструкции.

Таким образом, классификация печей химической промышленности выглядит следующим образом;

1) по видам производства;
2) технологическая;
3) по теплотехническим особенностям;
4) по конструктивным особенностям.

Классификация по виду производства. По виду производства печи подразделяют на такие основные группы:

1) печи производства серной кислоты;
2) печи производства соляной кислоты;
3) печи производства фосфорной кислоты;
4) печи производства плавиковой кислоты;
5) печи производства соды;
6) печи производства минеральных солей;
7) печи производства минеральных пигментов;
8) печи производства фосфора;
9) печи производства сероуглеродов;
10) печи производства извести;
11) печи производства катализаторов;
12) печи производства карбида кальция;

13) печи ремонтных цехов;
14) печи для сжигания отходов химических производств;
15) печи нефтехимических производств;
16) печи других производств.

Технологическая классификация. Печи каждого вида производства подразделяются:

1) в зависимости от технологического назначения (например, в сернокислотном производстве — печи обжига колчедана, печи для сжигания серы и печи для сжигания сероводорода);

2) от организации технологического процесса на печи периодического действия и печи непрерывного действия.

Классификация по теплотехническим особенностям. Печи каждой технологической группы по теплотехническим особенностям классифицируются следующим образом:

1. По тепловому эффекту процесса, осуществляемого в печи:

а) на печи с экзотермическими реакциями, т. е. выделяющегося тепла, достаточного для проведения процесса (иногда с отбором тепла),

б) на печи с эндотермическими реакциями (а также с нулевыми или незначительными экзотермическими). Для проведения процесса необходимо подводить тепло.

2. По способу подвода тепла печи с эндотермическим процессом подразделяются:

а) на печи с внутренним подводом тепла (необходимое тепло вводится непосредственно внутрь реакционного пространства);

б) на печи с внешним подводом тепла (необходимое тепло передается через стенку).

3. По виду источника тепла печи подразделяются на печи топливные (газообразное или жидкое топливо) и электрические (дуговые, сопротивления, индукционные и плазменные).

Классификация по конструктивным особенностям. Технологические и теплотехнические особенности в значительной степени предопределяют и конструктивные типы печей, а именно:

Шахтные печи — реакционная камера представляет собой вертикальную шахту. Материал загружается сверху и опускается под действием силы тяжести.

Ретортные печи — реакционная камера представляет собой реторту, исключающую доступ воздуха, с подводом тепла к материалу через стенку.

Камерные печи — в реакционную камеру материал вводится через форсунку или другое устройство.

Полочные печи — реакционная камера представляет собой одну или несколько полок, на которых лежит материал.

Тигельные и муфельные печи — в огневую камеру устанавливается тигель или муфель.

Трубчатые печи — в огневой камере находятся трубы, по которым протекает обрабатываемый жидкий или газообразный материал.

Карусельные печи — в реакционной камере вращается подина с материалом в твердом состоянии.

Печи с вращающимся барабаном — реакционная камера представляет собой горизонтальный или слегка наклонный барабан, при вращении которого материал перемещается.

Туннельные печи — реакционная камера в виде горизонтального канала большой длины. Материал передвигается по каналу на транспортерах, в вагонетках или на стеллажах.

Ванные печи — подина реакционной камеры имеет вид ванны, в которой продукт находится в расплавленном состоянии.

Печи с кипящим слоем — в реакционной камере твердая фаза — слой сыпучего материала взвешен потоком газа, но не перемещающегося по направлению этого потока.

Печи со взвешенными частицами — в реакционной камере твердые или жидкие частицы взвешены потоком газа и перемещаются вместе с ним.

Печная установка представляет собой сложный агрегат, состоящий из собственно печи и вспомогательного оборудования, причем все элементы печной установки взаимно связаны в работе. К этим элементам относятся: собственная печь — реактор, установки для сжигания топлива (топки, горелки и т. д.) или агрегаты превращения электрической энергии в тепловую; соединительные части (дымоходы и трубопроводы); приборы для управления гидравлическим режимом печи (шибера, задвижки и др.).

Вспомогательные устройства: воздухо- и газонагреватели; котлы-утилизаторы; дутьевые вентиляторы; механизмы для загрузки и выгрузки; контрольно-измерительная и регулирующая аппаратура; борова, дымососы, дымовые и растопочные трубы и др.

ПЕЧИ ПРОИЗВОДСТВА СЕРНОЙ КИСЛОТЫ

Общие сведения

Серная кислота H_2SO_4 является одним из важнейших продуктов химической промышленности. В технике ее получают из серы, сульфидов металлов и отходов различных промышленных производств, содержащих сернистый газ.

Сырье для получения сернистого газа. Сернистый газ получают, сжигая свободную или связанную (сульфидную) серу:

$$S + O_2 \longrightarrow SO_2$$

$$MeS + O_2 \longrightarrow SO_2 + MeO$$

Основным сырьем для промышленного получения сернистого газа является природная сера и пирит FeS_2.

В табл. 12 приведены некоторые физико-химические свойства серы, пирита и сульфида железа (FeS), продукта, который образуется при термическом разложении пирита:

$$FeS_2 \longrightarrow FeS + S$$

Сера лучшее сырье, так как при ее сжигании не образуется побочных продуктов (окислов железа, огарков); оборудование оказывается

Таблица 12

Физико-химические свойства серы и сульфидов железа

	Ромбическая сера	Моноклиническая сера	Сульфиды железа	
Химическая формула . .	S	S	FeS	FeS_2
Молекулярная или атомная масса	32,066	32,066	87,92	119,98
Температура плавления:				
K	386,0	392,1	1444—1467	915
°C	112,8	119,0	1171—1194	642 (температура размягчения)
Теплоемкость молекулярная, Дж/(°C · кг)	452+0,81T	465+0,91T	281+0,98T	310+0,67T

более простым и компактным; легче регулируется содержание SO_2 в H_2SO_4 в газе, что важно для дальнейшего получения H_2SO_4.

Из сульфидов металлов используют, в основном, серный и медный колчеданы (халькопирит). Помимо основного компонента колчеданы содержат примеси соединений меди, цинка, свинца, мышьяка, никеля, кобальта, селена, висмута, теллура, кадмия, карбонаты и сульфаты кальция и магния, небольшие количества золота и серебра и т. п. Содержание серы в серном колчедане, пригодном для непосредственного использования, колеблется от 32 до 52%, в чистом FeS_2 оно равно 53,5% (табл. 13).

Таблица 13

Состав различных сортов колчедана (в %), по данным А. Г. Амелина

Колчедан	$S_{общ}$	Fe	Cu	Zn	Al_2O_3	CaO	MgO	SiO_2	Влага
Рядовой уральский	51,18	45,0	0,63	—	0,57	0,015	0,05	1,24	0,08
	47,10	41,8	0,73	—	0,34	0,20	0,08	5,62	5,87
Среднеазиатский	30,75	18,47	—	—	0,32	2,08	0,53	—	—
Флотационный	38,61	34,40	0,80	0,70	4,50	1,19	0,65	18,72	
Пиритный концентрат	50,52	44,26	0,24	1,00	0,90	Следы	0,03	1,73	—
	45,38	40,16	0,60	0,41	0,38	0,15	0,19	10,58	—

Для увеличения концентрации серы в бедном колчедане его обогащают, чаще всего мокрым (флотационным) способом. Такой флотационный колчедан поступает на производство SO_2 в виде довольно мелкого порошка; это обстоятельство приходится учитывать при выборе типа печей для обжига. SO_2 получают в виде побочного продукта в цветной металлургии при обжиге цинковых, свинцовых, медных и других руд. Применяемое для этой цели оборудование сходно с применяемым для обжига колчедана, однако концентрации SO_2 в печных газах оказываются более низкими. Сернистый газ образуется также при сжигании топлива, содержащего серу, например, некоторых углей, сланцев и т. п.

Таблица 14

Содержание печного газа в зависимости от материала, содержащего серу

Сырье	Тип печи	Концентрация SO_2 в печном газе, %
Колчедан	Печи КС	11,0—14,5
Медная руда	Обжиговые печи	7—10
	Отражательные печи	2—15
	Конверторы	8
	Отражательные печи	1—2,5
Никелевый концентрат	Печи КС	9—12
Никелевый файнштейн	То же	5—7
Цинковые концентраты	»	8,4—9,7
Элементарная сера (жидкая)	Форсуночная печь	12—15
Элементарная сера (твердая)	Отражательная печь	10—12
Элементарная сера (твердая)	Печь КС	13—14

Таблица 15

Технические условия на серу по ГОСТу 127—64

	Природная			Газовая	
	высший сорт	1-й сорт	2-й сорт	1-й сорт	2-й сорт
Содержание серы, %, не менее . . .	99,9	99,5	98,5	99,8	98,8
Содержание влаги, %, не более . .	0,2	2,0	2,0	0,2	0,5
Содержание золы, %, не более . .	0,05	0,2	0,5	0,1	0,5
Кислотность, % (в пересчете на серную кислоту), не более	0,005	0,005	0,01	0,02	0,03
Содержание мышьяка, %, не более	0,0005	0,0005	0,003	0,01	0,05

Таблица 16

Физико-химические и технические свойства колчеданов

	Серный колчедан		Серный колчедан флотационный (по ГОСТу 447—51)			Пиритный концентрат	
	рядовой	порошковый	КСФ1	КСФ2	КСФ3	I	II
Содержание серы, %	35—50	35—50	> 45	> 42	> 36	50,5	46,4
Истинная плотность, кг/м³	4830—5200	4830—5200	—	—	—	—	—
Насыпная масса . .	2000—2500	2000—1500	1400—2000	—	—	—	—
Угол естественного откоса, градусы	45	45	30—37	—	—	—	—
Размер кусков, мм	6—8	Порошок	—	—	—	—	—

В табл. 14 приведены данные, характеризующие содержание печных газов. Технические условия на серу даны в таал. 15. Технические и физико-химические свойства колчедана характеризуются табл. 16.

Свойства колчеданов сильно зависят от гранулометрического состава и влажности.

Классификация печей

Печи сернокислотного производства по технологическому назначению подразделяются на следующие типы: 1) печи для обжига колчедана; 2) печи для сжигания серы; 3) печи для сжигания сероводорода.

Все рассматриваемые печи являются печами непрерывного действия. По тепловому эффекту — экзотермические реакторы. Выделяющееся тепло перекрывает собственную потребность и поэтому его необходимо отводить. По конструктивным особенностям печи подразделяются на следующие типы.

Печи для обжига колчедана: а) аэрофонтанные; б) с кипящим слоем; в) комбинированные (с верхней подачей и с кипящим слоем) и г) механические полочные.

Печи для сжигания серы: а) циклонные и б) камерные.

Печи для сжигания сероводорода — камерные.

Печи для обжига колчедана

Обжиг колчедана. При обжиге колчедана протекает несколько реакций: вначале промежуточная реакция термического разложения дисульфида железа FeS_2 с образованием сульфида железа FeS и выделением парообразной серы:

$$2FeS_2 \longrightarrow 2FeS + S_2 \quad -103{,}9 \text{ кДж}$$

Выделение серы начинается при температуре около 500 °С и ускоряется с дальнейшим ее повышением. Пары серы сгорают с образованием двуокиси серы:

$$S\,(\text{пар}) + O_2\,(\text{газ}) \longrightarrow SO_2\,(\text{газ}) \quad +362{,}4 \text{ кДж}$$

Сульфид железа FeS также сгорает, но точный механизм этого процесса не установлен и пока предложено несколько схем промежуточных реакций. По одной из них первой стадией окисления FeS является образование сульфатов железа, далее разлагающихся до окислов железа. По другим представлениям FeS непосредственно окисляется до окислов железа.

Суммарный процесс горения колчедана протекает с образованием либо окиси железа:

$$4FeS_2 + 11O_2 \longrightarrow 2Fe_2O_3 + 8SO_2 \quad +3415{,}7 \text{ кДж}$$

либо закись-окиси железа:

$$3FeS_2 + 8O_2 \longrightarrow Fe_3O_4 + 6SO_2 \quad +2438{,}2 \text{ кДж}$$

Сырье	Реакция горения	G_S^T	a
Сера	$S+O_2 \longrightarrow SO_2$	100	0
Колчедан	$4FeS_2+11O_2 \longrightarrow 2Fe_2O_3+8SO_2$	53,46	0,67
Колчедан	$3FeS_2+8O_2 \longrightarrow Fe_3O_4+6SO_2$	53,46	0,64
Сульфид железа	$4FeS+7O_2 \longrightarrow 2Fe_2O_3+4SO_2$	36,46	0,91
Цинковая обманка	$2ZnS+3O_2 \longrightarrow 2ZnO+2SO_2$	32,49	0,83
Пирротин	$4Fe_7S_8+53O_2 \longrightarrow 14Fe_2O_3+32SO_2$	39,62	0,86

Согласно этим реакциям, FeS_2 реагирует не полностью. В зависимости от условий в огарке остаются сульфиды железа и протекает ряд побочных реакций. Состав огарка (в %):

Железо	45,7—49,9
Медь	0,5—0,8
Сульфатная медь	0,2
Сульфидная сера (печи КС)	3,01

При наличии в колчедане SiO_2 образуется фаялит ($2FeO \cdot SiO_2$), а при наличии CaO комплексные соединения типа $CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot SiO_2$. Помимо состава исходного сырья состав огарка зависит от условия обжига (температурного режима).

В зависимости от сделанных допущений упрощенные балансовые формулы, рекомендуемые в некоторых работах для расчета выхода огарка, оказываются противоречивыми.

В газовой фазе помимо SO_2 содержится некоторое количество SO_3, ведущее к коррозии аппаратуры. Для снижения содержания SO_3 рекомендуют иметь температуру газа на выходе из печи около 850—900 °С, а затем быстро снижать ее до 425—400 °С.

Расчет материального баланса обжига можно вести различным образом. Согласно К. М. Малину и К. А. Полякову, выход огарка в долях от массы сухой руды

$$x=\frac{G_S^г-(1-a)\,G_S^ф}{G_S^г-(1-a)\,G_S^{ог}}$$

Таблица 17

Расчетные формулы для различного сырья

Выход огарка	Значение m	Формулы для вычисления объема воздуха (в м³), необходимого для горения	
		на 1 т сырья	на 1 т SO_2
—	1,0	$\left(\frac{700}{C_{SO_2}}+3{,}5\right)C_S$	$\frac{14\,930}{C_{SO_2}}+74{,}5$
$x=\frac{160-G_S^{ф}}{160-G_S^{ог}}$	1,375	$\left(\frac{700}{C_{SO_2}}+2{,}625\right)C_S$	$\frac{14\,930}{C_{SO_2}}+56$
$x=\frac{148-G_S^{ф}}{148-G_S^{ог}}$	1,33	$\left(\frac{700}{C_{SO_2}}+2{,}33\right)C_S$	$\frac{14\,930}{C_{SO_2}}+49{,}5$
$x=\frac{405-G_S^{ф}}{405-G_S^{ог}}$	1,75	$\left(\frac{700}{C_{SO_2}}+5{,}25\right)C_S$	$\frac{14\,930}{C_{SO_2}}+112$
$x=\frac{191-G_S^{ф}}{191-G_S^{ог}}$	1,5	$\left(\frac{700}{C_{SO_2}}+3{,}5\right)C_S$	$\frac{14\,930}{C_{SO_2}}+74{,}5$
$x=\frac{283-G_S^{ф}}{283-G_S^{ог}}$			

где $G_S^{г}$ — теоретическое содержание серы в данном химическом соединении, %; $G_S^{ф}$ — фактическое содержание серы в сухой руде, %; $G_S^{ог}$ — содержание серы в огарке, %; a — теоретический выход огарка, доли единицы (при полном сгорании).

Конкретные формулы для расчета различных сульфидов приведены в табл. 17. Объем обжигового газа, полученного при обжиге 1 т любого сырья, содержащего серу, определяют по следующей формуле:

$$V_г=\frac{1000C_S\cdot 22{,}4\cdot 100}{100\cdot 32C_S}=\frac{700C_S}{C_{SO_2}}$$

где C_S — количество выгорающей серы в сырье, %; C_{SO_2} — количество двуокиси серы в обжигаемом газе, %.

Объем воздуха $V_{возд}$ (в м³), необходимого для горения 1 т серного сырья, определяют по формуле:

$$V_{возд}=\frac{700}{C_{SO_2}}+7\,(m-1)\,C_S$$

где m — отношение числа молекул кислорода, вступающих в реакцию, к числу молекул, получающихся по реакции двуокиси серы.

Процесс горения колчедана идет с выделением тепла, величину которого можно вычислить по термохимическому закону Гесса.

Теплота образования FeS_2 составляет 148,64 кДж/г-мол, Fe_2O_3 816,46 кДж/г-мол и SO_2 296,85 кДж/г-мол.

Термохимическое уравнение имеет следующий вид:

$$4Fe+8S \longrightarrow 4FeS_2+4\cdot 148{,}64 \longrightarrow 4FeS_2+594{,}55 \text{ кДж}$$

$$4Fe+3O_2 \longrightarrow 2Fe_2O_3+2\cdot 816{,}46 \longrightarrow 2Fe_2O_3+1632{,}93 \text{ кДж}$$

$$8S+8O_2 \longrightarrow 8SO_2+8\cdot 296{,}85 \longrightarrow 8SO_2+2374{,}80 \text{ кДж}$$

Термохимическое уравнение реакции горения FeS_2 получим из этих уравнений:

$$4FeS_2+11O_2 \longrightarrow 2Fe_2O_3+8SO_2+1632{,}9\,[390]+$$
$$+2374{,}80\,[567{,}2]-594{,}55\,[142]=3413{,}24 \text{ кДж}$$

Следовательно, теплота горения FeS_2:

$$\frac{3413{,}24\cdot 1000}{4\cdot 119{,}97}=7113{,}71 \text{ кДж/кг}$$

При горении колчедана с содержанием выгорающей серы (в %), равным $C_{S\,(выг)}$, выделится теплоты, не считая тепла, выделяемого при реакциях с примесями к колчедану:

$$Q=\frac{7113{,}71C_{S(выг)}}{53{,}46} \quad 133{,}14 \text{ кДж/кг}$$

В табл. 18 приведены данные по количеству выделяемого тепла в зависимости от состава огарка.

Таблица 18

Количество тепла, выделяющегося при обжиге колчедана

Содержание железа в огарке при $\psi_{недож}=0$ в виде (в %)			Выделяется тепла на 1 кг сгоревшей серы	Выделяется тепла на 1 кг обожженного колчедана $FeS_2=1$; $\psi_{недож}=0$
Fe_2O_3	Fe_3O_4	Fe_2SiO_4	кДж	кДж
100	—	—	13 180	7119
75	25	—	13 080	7050
50	50	—	12 900	6960
25	75	—	12 720	6890
—	100	—	12 600	6800
—	90	10	12 580	6750
—	75	25	12 250	6600
—	50	50	12 110	6380

Общий тепловой баланс горения колчедана ($\varphi = 1$, $\psi = 0$ может быть записан:

$$Q_{хим}=Vc_{г}t_{г}+G_{ог}c_{ог}t_{ог}+Q_{пов}$$

где V — объем печного газа, м/ч; $c_г$ — теплоемкость печного газа, кДж/(м³·°С); $t_г$ — температура печного газа, °С; для кипящего

слоя $t_г \simeq t_{ог}$, для сжигания $t_г \simeq t_{ог} + 200$ °С; $G_{ог}$ — масса огарка, кг/ч; $c_{ог}$ — теплоемкость огарка, Дж/(м³·°С); $t_{ог}$ — температура огарка, °С; $Q_{пот}$ — суммарная потеря тепла, Вт.

Процесс обжига колчедана следует вести в определенном интервале температур $t_{мин} \leqslant t \leqslant t_{макс}$. При слишком низких температурах скорость процесса недостаточна, при слишком высоких — происходит расплавление огарка и образуется Fe_2O_4; возможна также коррозия аппаратуры и другие отклонения от оптимального режима.

Температурным режимом печи можно управлять: а) меняя коэффициент избытка воздуха; б) меняя количество тепла, отводимое из зоны горения с помощью экранов и в) используя сырье с различным содержанием S и влажностью.

Изменение коэффициента избытка воздуха a зависит от заданного содержания SO_2 в печном газе, увеличение же a ведет к снижению теплового к. п. д. процесса.

Возможность интенсивного отвода тепла с помощью экранов особенно удобно реализуется в аппаратах с кипящим слоем, так как в этих условиях из-за принципиально иного механизма теплообмена напряженность экрана возрастает иногда более, чем на порядок.

При определении температурного режима печей необходимо также учитывать, что во избежание хлопков эта температура должна превышать температуру воспламенения колчедана:

	$t_{воспл}$, °С		$t_{воспл}$, °С
Пирит	402	Пирротин	420
Марказит	378	Халькопирит	375

К. М. Малин приводит общую формулу для определения времени горения колчедана:

$$\tau = \frac{d\left(1-\sqrt[3]{1-n}\right)^2}{K_0 \exp^{-A/Rt} C_{O_2}^m F^k}$$

где τ — время горения; d — средний диаметр кусков колчедана; n — заданная степень выгорания серы, доли единицы; A — кажущаяся энергия активации; K_0 — константа, характеризующая сырье; C_{O_2} — среднее содержание кислорода в зоне обжига; F — поверхность обжига; m, k — показатели, зависящие от условий обжига.

В табл. 19 приведены данные по скорости выгорания серы при обжиге различных колчеданов.

Скорость обжига в кипящем слое исследовали А. М. Малец и В. А. Сафиулин. В последней работе отмечается, что необходимое время обжига складывается из периода индукции и периода горения, рассчитываемых по уравнению:

$$\tau = \tau_{инд} + \tau_{гор} = \frac{0{,}148}{w^{0{,}7}\left(0{,}364 - 0{,}88 \lg \frac{1000}{t}\right)} +$$

$$+ 2{,}44 p_{O_2}^{-0{,}65} w^{-0{,}5} \exp\left(\frac{2540}{T}\right) \lg \frac{1}{1-\sigma}$$

где p_{O_2} — парциальное давление кислорода; σ — заданная степень выжига; w — скорость газа в слое.

А. Н. Терновская на основании практических данных считает, что интенсивность процесса в печах КС следует считать не по времени пребывания колчедана (которое практически оказывается много больше расчетного), а по времени пребывания газа; последнее должно составлять 7—8 с.

Таблица 19

Скорость выгорания серы при обжиге различных колчеданов в лабораторных условиях в неподвижном слое (в навеске 0,72 г) и температуре 800 °С

Продолжительность обжига, мин	Количество выгоревшей серы, г						
	рядовой уральский колчедан, 48% S	флотационные хвосты	среднеазиатский колчедан		углистый колчедан 30% S	медная руда 8% S	кольский пирротин
			33% S	36,7% S			
3	0,438	0,356	0,388	0,390	0,336	0,329	0,127
6	0,594	0,500	0,530	0,506	0,466	0,465	0,240
9	0,696	0,617	0,620	0,598	0,549	0,562	0,330
12	0,720	0,697	0,678	0,658	0,631	0,617	0,412
15	—	0,720	0,711	0,692	0,682	0,655	0,417
18	—	—	0,719	0,707	0,708	0,677	0,518
21	—	—	0,720	0,713	0,720	0,691	0,559
24	—	—	—	0,715	—	0,699	0,596
27	—	—	—	0,716	—	0,705	0,615

Использование более бедных колчеданов приводит к тому, что сырье во все возрастающем количестве поступает в виде флотационного колчедана. Соответственно современные печи должны быть приспособлены для обжига высокодисперсного или же гранулированного колчедана.

Повышенная влажность флотационного колчедана существенно отражается на тепловом балансе печей и входит в качестве составляющей в величину $Q_{пот}$. При влажности около 10% все «избыточное» тепло процесса расходуется на испарение влаги.

За счет избыточного тепла процесса может быть получен водяной пар. В то же время сушка флотационного колчедана требует затрат тепла, например, того же пара.

Для того чтобы получить газ более высокой концентрации, следует работать при минимальных значениях a. Очевидно, при прочих равных условиях (заданном значении ψ) a можно снижать:

1) если ввиду малых размеров частиц и больших удельных поверхностей потери фазового массообмена, внутренняя и внешняя диффузия не лимитирует процесс;

2) если общая схема приближается к противоточной;

3) если обеспечена большая длительность обжига на конечных стадиях — когда остаточное содержимое FeS_2 в огарке уже мало.

К чисто технологическим требованиям, предъявляемым к печам, можно отнести:

1) простоту и надежность конструкции;

2) легкую управляемость, возможность полной механизации и автоматизации;

3) санитарные условия в цехе, отсутствие возможности пыли и выделения тепла, попадание SO_2 в атмосферу и т. д.

4) минимальный объем огарка и их умеренную температуру;

5) минимальное количество, минимальный объем и простоту вспомогательного оборудования — циклонов, электрофильтров, загрузочных и разгрузочных средств и т. д.

Печи аэрофонтанные. Печи с нижним подводом сырья. Флотационный колчедан и пиритный концентраты отличаются от рядового колчедана высокой тониной помола (до 0,7 мм) и поэтому имеют высокоразвитую реакционную поверхность. Большим преимуществом печи пылевидного обжига, по сравнению с механическими полочными печами, помимо простоты конструкции и дешевизны является отсутствие внутри печи движущихся частей, подвергающихся действию высоких температур и коррозии. Кроме того, обжиг по этому методу может давать газ значительно более высокой концентрации (до 14—15% SO_2) без вреда для качества огарка. Повышение температуры в печи при увеличении концентрации газа обусловливает ускорение процесса, с избытком покрывающее замедление процесса, которое может произойти от понижения содержания в газе кислорода.

В то же время из-за низкой концентрации частиц в печах объемного сжигания (аналогично гетерофазным процессам с отдельными взвешенными твердыми частицами) вероятность столкновения нагретых выше температуры плавления частиц и образования комков относительно мала.

Печь для обжига пылевидного колчедана с нижним подводом сырья представляет собой стальной, футерованный изнутри шамотным кирпичом цилиндр, внутренним диаметром от 3,5 до 4,25 м, высотой цилиндрической части от 7 до 10 м (рис. 3).

Колчедан из бункера через питатель погружают в горизонтальный участок пневматической линии и затем в форсунку, расположенную в нижней части печи под углом 10—12° и представляющую собой сужающийся конус. Скорость ввода колчедана и воздуха в печь с нижней подачей составляет 30—40 м/с. Таким образом, в этом элементе печи процесс идет со взвешенными частицами, увлекаемыми потоком газа. По мере подъема пылегазовый факел рассеивается, поток теряет скорость и частицы под действием силы тяжести осаждаются в печи.

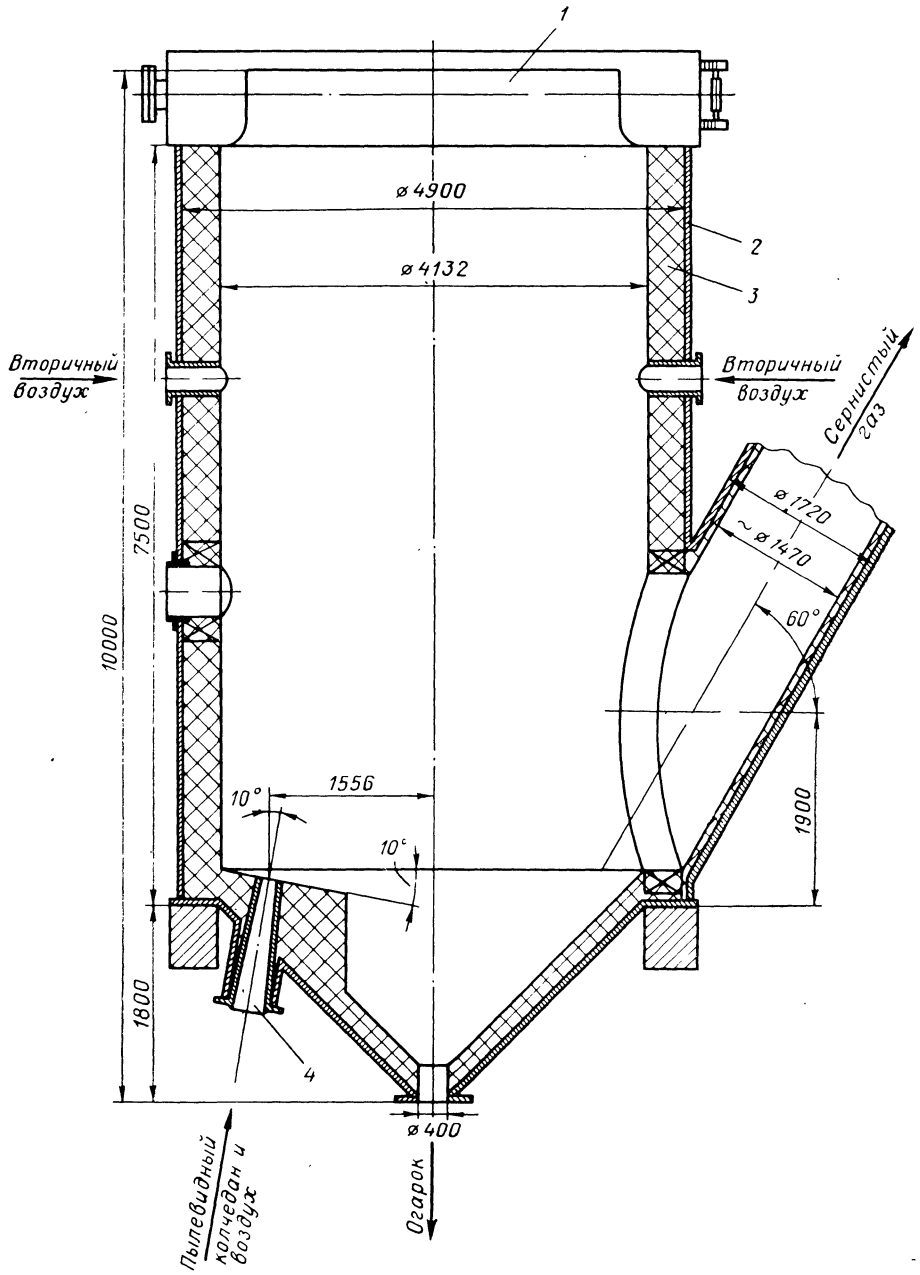


Рис. 3. Печь аэрофонтанная для обжига колчедана с нижним подводом:
1 — экран; *2* — кожух; *3* — футеровка; *4* — сопло.

Обжиг частиц происходит как на стадии подъема (во взвешенном состоянии и инерционного), так и на стадии осаждения. Для осуществления последней стадии обжига в верхнюю часть печи (камеры) подается вторичный воздух.

Верхний свод печи экранирован. Экранирование свода трубами, по которым течет вода, необходимо для более интенсивной работы печи, что достигается отнятием части тепла, выделяющегося при реакции горения серы, т. е. позволяет работать при более низких температурах обжига, но с более высокой нагрузкой. Следует отметить, что удельная тепловая нагрузка таких экранов меньше, чем в печах с кипящим слоем.

Обжиговый газ с температурой 900—950 °С выводится через газоход, расположенный в нижней части печи, и поступает в котел-утилизатор, затем в электрофильтр и в последующую аппаратуру сернокислотной системы. Исследования УНИХИМа показали, что установка газохода со стороны форсунки при радиальном подводе вторичного воздуха позволяет снизить унос пыли в 4—5 раз. Вторичный воздух вводится на расстоянии 2600 мм от экрана через фурмы, устанавливаемые радиально или тангенциально. Тангенциальный ввод вторичного воздуха позволяет создавать организованное движение частиц внутри печи. Время пребывания частиц в объеме значительно увеличивается. При скорости выше 20—25 м/с появляется опасность шлакования боковых стенок, что приводит к резкому повышению пылеуноса. При радиальном вводе вторичного воздуха создается беспорядочное движение частиц, но достигается лучшее использование объема печи.

Пылеунос практически не зависит от скорости ввода вторичного воздуха.

Оптимальное количество вторичного воздуха, вводимого в печь, выраженное в долях первичного, составляет 0,7—1,2; более точно его устанавливают опытным путем.

Обжиг пылевидного колчедана в таких печах проходит очень интенсивно: даже при низких температурах (700—750 °С) в течение 0,5 с удаляется около 95% всей сульфидной серы; при 1000 °С степень удаления серы за 0,5 с достигает 98,5%. Процесс обжига пылевидного колчедана необходимо вести при 900—1000 °С.

Интенсивность современных печей обжига во взвешенном состоянии, выражаемая количеством сухого колчедана (условного с содержанием 45% S), сжигаемого в 1 м³ объема печи, составляет 1000 кг/(м³·сутки).

Содержание серы в огарке является основным показателем работы печи, и оно должно быть менее 2%.

В расчетах температуру воды, выходящую из охладительных экранов свода, необходимо принимать равной 60 °С.

К основным недостаткам печей пылевидного обжига флотационного колчедана во взвешенном состоянии следует отнести высокую запыленность выходящего из печи сернистого газа. Вынос пыли достигает 40—50% от общей массы огарка.

	Тип печи	Интенсивность	
		подовая, кг/м²·сутки)	объемная, кг/(м³·сутки)
Балаковский комбинат химического волокна	Печи с водотрубным котлом-утилизатором	10 200	1020
Воскресенский химический комбинат	Печи с газотурбинными котлами	8 800	1070
	Печи с теплообменниками башенного цеха	5 360	492
	Печи с теплообменниками печного отделения	8 500	840
Завод «Североникель»	Опытно-промышленная печь	4 100 ~9 500	— —
Новомосковский химический комбинат	Печи с водотрубным котлом-утилизатором	6 980	660
Сумгаитский суперфосфатный завод	То же	9 000	940

Печи с кипящим слоем (КС). Общие сведения. В настоящее время в сернокислотной промышленности и при обжиге сульфидных руд в цветной металлургии все больше используют печи КС. В табл. 20 и 21 приведены данные, характеризующие работу таких печей.

Печи КС имеют следующие преимущества: высокую интенсивность, высокую степень выгорания серы, содержание в газах до

Таблица 21

Показатели работы печей различной конструкции для обжига цинковых концентратов

Показатели	Обжиг в многоподовых печах	Обжиг во взвешенном состоянии	Обжиг в кипящем слое
Производительность печи, т/сутки	40—50	100—180	100—165
Удельная производительность, т/(м²·сутки)	0,18—0,24	—	3,5—13,5
т/(м³·сутки)	0,12	0,4	0,38—0,8
Расход топлива %	1,0—6,5	—	—
Получено пара, т/т концентрата	—	0,8	0,8
Содержание SO_2 в печном газе, %	4,0—4,5	8—10	8—10
Содержание серы в огарке, %	4,5—2,0	2,3—0,8	1,5—0,8
Содержание серы в циклонной пыли, %	—	4,0	4,5—6,0

Таблица 20

Основные показатели работы обжиговых печей с кипящим слоем

Удельный расход воздуха, м³/м²		Сопротивление кипящего слоя, Па	Температура, °С		концентрация SO_2, %	содержание серы в огарке, %
на решетку форкамеры	на беспровальную решетку		в слое	по выходе из печи		
1300	950	9 000	740	850	14,5	1,20
1020	700	9 000	715	850	14,2	1,25
2500	600	9 000	610	730	12,5	1,81
1500	700	9 000	665	885	13,8	1,28
—	345	10 300	930	—	7,8	1,52
—	~610	—	~1050	—	9,1	~0,25
1200	600	9 500	740	840	11,2	0,81
1450	800	11 000	770	920	14,0	0,87

15% SO_2; они просты в регулировании и контроле. Следует также отметить, что процесс в кипящем слое является сравнительно инерционным (по сравнению с печами пылевидного обжига), поэтому колебания в количестве подаваемого материала, величине кусков и особенности влажности, которых на практике не удается избежать, не вызывают значительных колебаний концентрации SO_2 в печном газе и других нарушений режима.

Однако такие печи сложны по своей конструкции и основная часть огарка (до 90%) уносится печным газом, а это усложняет пылеочистку.

При обжиге колчеданов в кипящем слое процесс протекает как собственно в слое, так и в надслойном пространстве, в которое выносится бóльшая часть материала. Для этого в ряде конструкций печей воздух подается как в слой (под решетку), так и в надслойное пространство. От подачи вторичного воздуха следует отказаться, поскольку именно в слое должно быть обеспечено необходимое соотношение серы и кислорода. Отвод тепла осуществляется с наибольшей интенсивностью в самом слое, поэтому, если процесс обжига в основном протекает в слое, общий режим работы будет наиболее благоприятным. Дожигание части колчедана в надслоевом пространстве позволяет повышать температуру на выходе из печи (по сравнению со слоем) и подавлять образование SO_3.

Печи КС выполняются как постоянного, так и переменного по высоте сечения. Последнее вызвано стремлением организовать над подом наиболее интенсивное перемешивание, и в то же время замедлить унос огарка. Однако, если угол раскрытия стенок аппарата слишком велик, вместо кипящего образуется так называемый фонтанирующий слой; с увеличением же высоты слоя (что также позволяет получить большую разницу в скорости газа на уровне пода и поверхности слоя) растет потеря напора газа в слое.

Известны конструкции обжиговых печей, различающихся как по конфигурации самой печи (прямоугольные, круглые, конусные), так и по конструкции отдельных элементов (узла питания, распределительной решетки, пода, узла выгрузки огарка и экранов). Принципиальных отличий между печами для обжига колчеданов, цинковых руд и других печей нет; работа этих печей различается по режиму.

Следует также остановиться на равномерности псевдоожижения по всему объему слоя. Если кипение происходит недостаточно интенсивно (например, мало число псевдоожижения $w/w_{мин}$ — отношение рабочей скорости газа и той минимальной скорости, при которой происходит псевдоожижение слоя), например, из-за плохой конструкции решетки или недостаточной высоты слоя, в нем образуются устойчивые каналы, а если из-за плавления или размягчения частиц, происходит их агломерация; в слое образуются застойные зоны, непсевдоожиженные области, образуются «козлы» и печи приходится останавливать. Это обстоятельство накладывает дополнительные ограничения на выбор режима псевдоожижения и конструкции печи.

В печах КС можно обжигать не только флотационный колчедан, но и более крупный дробленый материал. При сжигании дробленого колчедана, не опасаясь уноса пыли с газом, можно работать с более высокой скоростью газа и соответственно обжигать большое количество колчедана на единицу площади решетки; однако скорость обжига при этом снижается.

Так как унос огарка в печах КС велик, обжиговый газ подвергают двойной очистке, вначале в циклонах (где отделяется основная масса наиболее крупных частиц пыли), а затем в электрофильтрах.

Из-за высокой скорости процесса горения и интенсивности перемешивания в кипящем слое практически подвергается обжигу не колчедан, а огарок. Высота кипящего слоя достигает 1000 мм.

Температура в печах КС во избежание слипания частиц сырья не должна превышать 800 °С. Полное выгорание серы обеспечивается при поддержании в слое температуры около 750 °С, температуру по выходе из печи поднимают до 850—900 °С.

В охлаждающих элементах коэффициент теплопередачи в кипящем слое составит около 290 Вт/(м^2·°С).

Печи КС можно разделить на следующие типы: 1) КС однозонные; 2) УРКС и 3) ДКСМ.

Печь КС однозонная для обжига колчедана. Конструирование печей КС для обжига флотационного колчедана шло по пути создания аппаратов с максимально возможной подовой

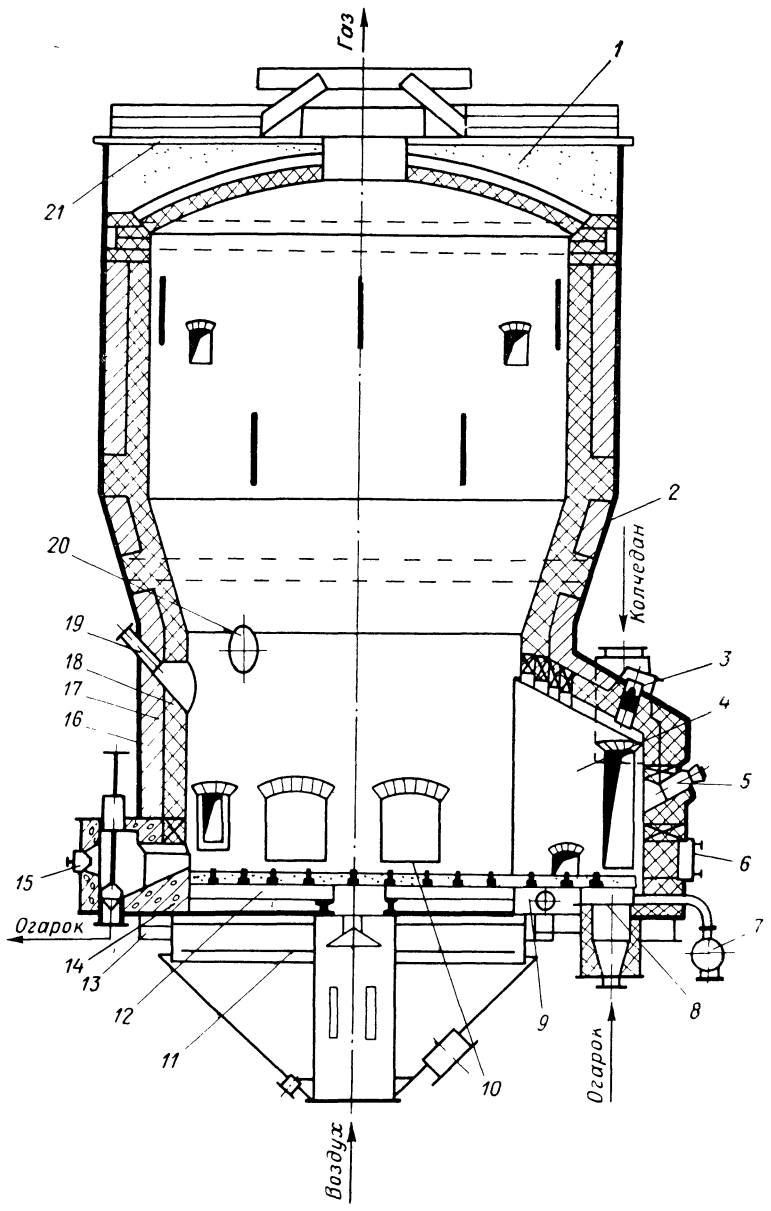


Рис. 4. Печь КС производительностью 200 т колчедана в сутки:

1 — засыпка; *2* — асбестовая изоляция; *3* — люк форкамеры; *4* — форкамера; *5* — горелка для газа или форсунка для мазута; *6* — люк; *7* — коллектор для подачи воздуха к провальной решетке форкамеры; *8* — решетка провальная форкамеры из колосников; *9* — камера для подачи воздуха к беспровальной решетке форкамеры; *10* — окно для установки охлаждающего элемента; *11* — распределительная решетка; *12* — подовая решетка; *13* — опорная часть печи; *14* — жароупорный бетон; *15* — сопло; *16* — кожух печи; *17* — диатомовый кирпич; *18* — шамотный кирпич; *19* — смотровое окно; *20* — окно для горелки или форсунки; *21* — крышка печи.

интенсивностью при одновременном сокращении их высоты за счет расширения верхней части, расположенной над кипящим слоем.

По конструктивным соображениям диаметр верхней части цилиндрической части был принят в 1,3—1,4 раза больше нижнего, что приводит к падению скорости обжигового газа в этой части печи в 1,8 раза.

На рис. 4 представлена печь КС для обжига флотационного 45% колчедана производительностью 200 т колчедана в сутки.

Стальной корпус печей футерован шамотным кирпичом. Печь имеет загрузочную камеру (форкамеру), снабженную провальной

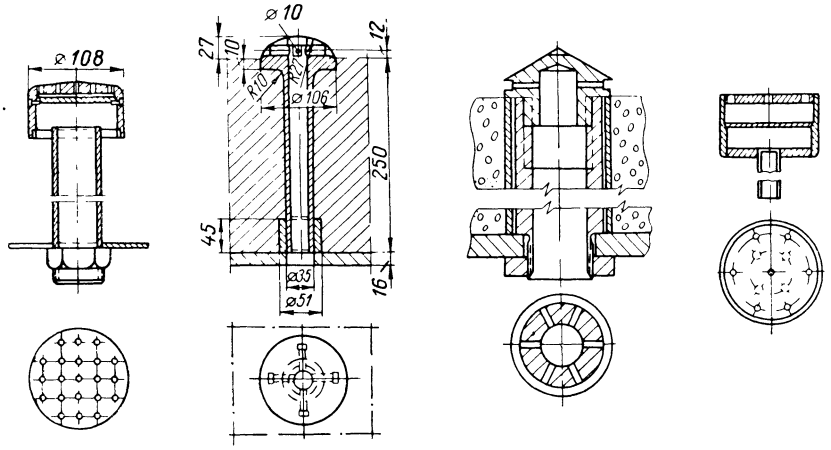


Рис. 5. Конструкция дутьевых сопл.

и непровальной решетками. Применение форкамеры предохраняет подину печи от забивания крупными кусками колчедана, спеками огарка, посторонними предметами и даст возможность вертикально расположить спускную трубу от тарельчатого питателя (во избежание зависания в ней колчедана).

Под печи состоит из беспровальной решетки (~90% площади), частично заходящей в форкамеру и провальной колосниковой решетки. Беспровальная решетка представляет собой стальной перфорированный лист, залитый жароупорным бетоном на высоту 120 мм и заармированный двумя рядами круглой стали. В отверстиях беспровальной и колосниках провальной решеток установлены воздушные сопла (грибки) (рис. 5). При помощи распределительной решетки, устанавливаемой в воздушном коробе, достигается равномерное распределение воздуха по сечению. Скорость выхода воздуха из решетки составляет не менее 10—12 м/с. Воздух под подину печи подается раздельно тремя потоками: под провальную и беспровальную решетки форкамеры и беспровальную решетку пода.

Для интенсификации кипения влажного и более тяжелого, чем огарок, колчедана под колосниковую решетку подается воздуха в 1,8—2 раза больше, чем в беспровальную решетку.

Огарок удаляют из печи через бункер форкамеры из противоположной стороны печи через клапанный затвор, расположенный на уровне неправильной решетки.

Для розжига печи над кипящим слоем наклонно к горизонту установлены газовые горелки (мазутные форсунки).

Над решеткой в футеровке имеются отверстия для установки охлаждающих элементов в кипящем слое. Для наблюдения за состоянием слоя и факелом горения установлены гляделки, обдуваемые воздухом. Для более полного использования внутреннего объема печи выход газа из них осуществляется в центре свода. Для проведения чистки и ремонта внутри печи установлены лазы, расположенные на уровне пода и расширенной верхней цилиндрической части печи.

Основные показатели оптимального технологического режима работы печи КС:

Интенсивность печи:	
подовая	9 т/(м²•сутки)
на верхнее сечение кипящего слоя	8 »
на объем печи	0,9—1,0 »
на объем слоя	7—10 »
Концентрация SO_2	14—14,5 объемн. %
на выходе из печи	11—12 объемн. %
после электрофильтра	730—770 объемн. %
Температура газа	
на выходе из печи	850—870 °С
после котла-утилизатора	450 °С
на выходе в электрофильтр	425—400 °С
на выходе из электрофильтра, не ниже	380 °С
Содержание огарковой пыли в газе	
после печи	250—360 г/м³
после котла	200—280 »
перед электрофильтром	15—30 »
после электрофильтра	0,05—0,1 »
Распределение вывода огарка по печному агрегату (примерное):	
печь	4—6%
котел	20—15%
циклон	65—75%
электрофильтр	7—10%
Содержание серы (среднее) во всем огарке	1,0—1,2%
Удельный расход воздуха	1500—1800 м³/(м²•ч)
в форкамере на основной подине	750—850 »
Сопротивление кипящего слоя	10 000—13 000 Па
Разрежение:	
на выходе из печи	50—100 Па
на входе в циклон	600—800 »
на входе в электрофильтр	1200—1800 »
Выработка пара на 1 т 45% колчедана:	
насыщенного	1,4 т
энергетического	1,2 »
Параметры пара:	
температура перегрева	450 °С
давление	4.0 МПа
Время охлаждения газа в котле-утилизаторе от 900 до 450 °С	0,3—0,5 с

Техническая характеристика печей КС для обжига флотационного колчедана приведена в табл. 22.

Таблица 22

Техническая характеристика печей КС для обжига флотационного колчедана

Показатели	Данные		
Производительность печи по 45% колчедану, т/сутки	100	200	450
Площадь дутьевого пода (в м²):			
общая	9	20,1	51
основного пода	7,05	17,7	45,5
провальной части форкамеры	1,08	1,04	2,7
беспровальной части форкамеры	0,87	1,36	2,77
Подовая интенсивность, т/(м² · сутки)	11	10	8,8
Диаметр цилиндрической части печи (в мм):			
нижней	3270	4750	8144
верхней	4270	6200	8840
Внутренний объем печи, м³	90	222	450
Удельный объем печи, м³/м² пода	10	11	8,8
Расход воздуха, тыс. м³/ч	9—10	19—20	43—45
Время пребывания газа в печи, с	8	9,5	9,0
Сопротивление (в Па):			
кипящего слоя	10 000	11 000—12 000	13 000—13 000
подовой решетки	1000	1300—1500	1500—2000
Количество дутьевых сопел:			
общее	444	847	2691
беспровальной решетки	444	787	2547
провальной решетки форкамеры	—	60	144
Отношение среднего живого сечения выходных отверстий сопел к площади пода, %	2,52	2,08	2,3
Поверхность охлаждающих элементов КС (в м²):			
испарительная	14,7	15	34
пароперегревательная	—	17	43
Давление в котле-утилизаторе, МПа	4,0	4,0	4,0

Методика расчета печи с кипящим слоем для обжига флотационного серного колчедана. Исходные данные для расчетов:

Производительность печи по колчедану (45% S)	B, т/сутки
Объемная интенсивность (опытная величина) равная 1,25	$U_{об}$ »
Содержание серы:	
в колчедане	$G_S^к$, %
в огарке	$G_S^{ог}$, %
Содержание SO_2 в обжиговом газе	G_{SO_2}, %
Максимальная скорость газа в слое	ω, м/с
Влажность колчедана (на рабочую массу)	W, %
Доля огарка, выносимого из кипящего слоя	x
Площадь форкамеры (по конструктивным соображениям)	$f_ф$, м²

Температура:

колчедана	$t_к$, °С
воздуха на входе в печь	$t_в$, °С
в кипящем слое	$t_{сл}$, °С
газов на выходе:	
из печи	$t'_{вых}$, °С
из котла-утилизатора	$t''_{вых}$, °С

Энтальпия:

насыщенного пара	$H_{н.п}$, кДж/кг
питательной воды	$H_{п.в}$ »
котловой воды	$H_{к.в}$ »
холодной воды	$H_{х.в}$ »

Коэффициент теплопередачи [в Вт/(м² · °С)]:

в кипящем слое	$K_{сл}$
в конвективном котле-утилизаторе	$K_{к.у}$

Материальный расчет обжига. Расчетный часовой расход колчедана (в кг/ч):

$$B_{расч} = \frac{45\,000B}{24G_S^к}$$

Удельный выход огарка (в кг/кг сухого колчедана):

$$a = \frac{160 - G_S^к}{160 - 0{,}4G_S^{ог}}$$

Степень выгорания серы из колчедана:

$$\beta = 1 - \frac{G_S^{ог}}{G_S^к} a$$

Объем сухих обжиговых газов (в м³/кг):

$$V_{с.г} = 68{,}4 \cdot 10^{-2} \frac{G_S^к}{G_{SO_2}}$$

Объем сернистого ангидрида в обжиговом газе (в м³/кг):

$$V_{SO_2} = 68.4 \cdot 10^{-4} G_S^к$$

Объем кислорода в обжиговом газе (в м³/кг):

$$V_{O_2} = 14{,}4 \cdot 10^{-4} \left(\frac{100}{G_{SO_2}} + 0{,}4 \right) G_S^к$$

Объем азота в обжиговом газе (в м³/кг):

$$V_{N_2} = 54 \cdot 10^{-4} \left(\frac{100}{G_{CO_2}} + 0{,}4 \right) G_S^к$$

Объем сухого воздуха для сжигания колчедана (в м³/кг):

$$V_{с.в} = 68{,}4 \cdot 10^{-4} \left(\frac{100}{G_{SO_2}} + 0{,}4 \right) G_S^к$$

Объем влажного воздуха, подаваемого в печь (в м³/кг):

$$V_{\text{в. в}} = (1 + \nu) V_{\text{с. в}}$$

где ν — влагосодержание воздуха.

Объем водяных паров в обжиговом газе (в м³/кг):

$$V_{H_2O} = V_{\text{в. в}} + 0{,}0124W \frac{100}{100 - W}$$

Тепловой расчет печи. Приход тепла:

1. Количество тепла, вносимое сухим колчеданом

$$Q_{\text{с. к}} = c_{\text{с. к}} t_{\text{к}} B_{\text{расч}}$$

где $c_{\text{с. к}}$ — теплоемкость сухого колчедана, кДж/(кг·°С).

2. Количество тепла, вносимое влагой колчедана (в Вт):

$$Q_{H_2O} = c_{H_2O} t_{\text{к}} B_{\text{расч}} \left(\frac{100}{100 - W} - 1 \right)$$

3. Количество тепла, вносимое влажным воздухом (в Вт):

$$Q_{\text{в. в}} = c_{\text{в. в}} t_{\text{в. в}} V_{\text{в. в}}$$

4. Количество тепла (в Вт), выделяющееся при сгорании колчедана

$$Q_{\text{гор}} = Q \beta B_{\text{расч}}$$

и суммарный количественный приход тепла в печь

$$Q'_{\text{прих}} = Q_{\text{с. к}} + Q_{H_2O} + Q_{\text{в. в}} + Q_{\text{гор}}$$

Расход тепла:

1. Количество тепла, израсходованное на испарение влаги колчедана (в Вт)

$$Q_{\text{исп}} = [(100 - t_{\text{к}}) c_{H_2O} + r] \left(\frac{100}{100 - W} - 1 \right) B_{\text{расч}}$$

где r — теплота парообразования, кДж/кг.

2. Количество тепла, выносимое обжиговыми газами из печи (в Вт):

$$Q'_{\text{г}} = \left(\sum cv \right) t'_{\text{вых}} \beta B_{\text{расч}}$$

3. Количество тепла, выносимое огарком из печи (в Вт):

$$Q'_{\text{ог}} = [(1 - x)(c_{\text{ог}} t)_{\text{сл}} + x (c_{\text{ог}} t)'_{\text{вых}}] a B_{\text{расч}}$$

где $c_{\text{ог}}$ — теплоемкость огарка, кДж/кг.

4. Количество тепла, теряемое в окружающую среду (в Вт):

$$Q'_{\text{пот}} = 0{,}01 Q'_{\text{прих}}$$

где 0,01 — опытное значение.

Суммарное количество тепла, выносимое из печи:

$$Q'_{\text{расх}} = Q_{\text{исп}} + Q'_{\text{г}} + Q'_{\text{ог}} + Q'_{\text{пот}}$$

Расчет основных конструктивных размеров печи

Интенсивность на верхнее поперечное сечение кипящего слоя [в т/(м²·сутки)]

$$U_{\text{сеч}} = U_{\text{под}} = \frac{525 G_{\text{S}}^{\text{к}} W}{\beta V_{\text{в. г}} (273 + t_{\text{сл}})}$$

Площадь верхнего поперечного сечения кипящего слоя (в м²):

$$F_{\text{сеч}} = B / U_{\text{сеч}}$$

Диаметр нижней части цилиндрической части печи (в м):

$$D = 1{,}13 \sqrt{F_{\text{сеч}}}$$

Площадь пода печи (в м²):

$$F_{\text{под}} = F_{\text{сеч}} + f_{\text{ср}}$$

Внутренний объем печи (минимальный) (в м²):

$$V_{\text{вн}} = B / U_{\text{об}}$$

Печь ДКСМ для обжига колчедана. Печь ДКСМ (печь с двумя кипящими слоями Малеца) предназначена для сжигания колчедана в нижнем слое и охлаждения обжиговых газов в верхнем слое (рис. 6).

Преимуществом печи ДКСМ перед печами КС является интенсификация процесса утилизации избыточного тепла горения колчедана, а также охлаждения обжиговых газов на втором слое, созданном огарковой пылью до 450 °С, с целью снижения образования серного ангидрида.

Присутствие серного ангидрида в больших количествах ведет к сульфатизации огарковой пыли и затрудняет электростатическую очистку обжигового газа. Верхний кипящий слой создается при условии, что скорость газового потока в отверстиях газораспределительной решетки создает динамический напор больше, чем давление кипящего слоя на площадь этих отверстий. Для образования верхнего кипящего слоя необходимо также осаждение частиц огарка, поступающих из нижней зоны, что достигается резким снижением линейной скорости потока газа в верхней зоне печи.

Увеличением поперечного сечения реакционной камеры в зоне верхнего кипящего слоя, а также возвратом огарка в верхний кипящий слой из пылеулавливающего циклона, расположенного над печью.

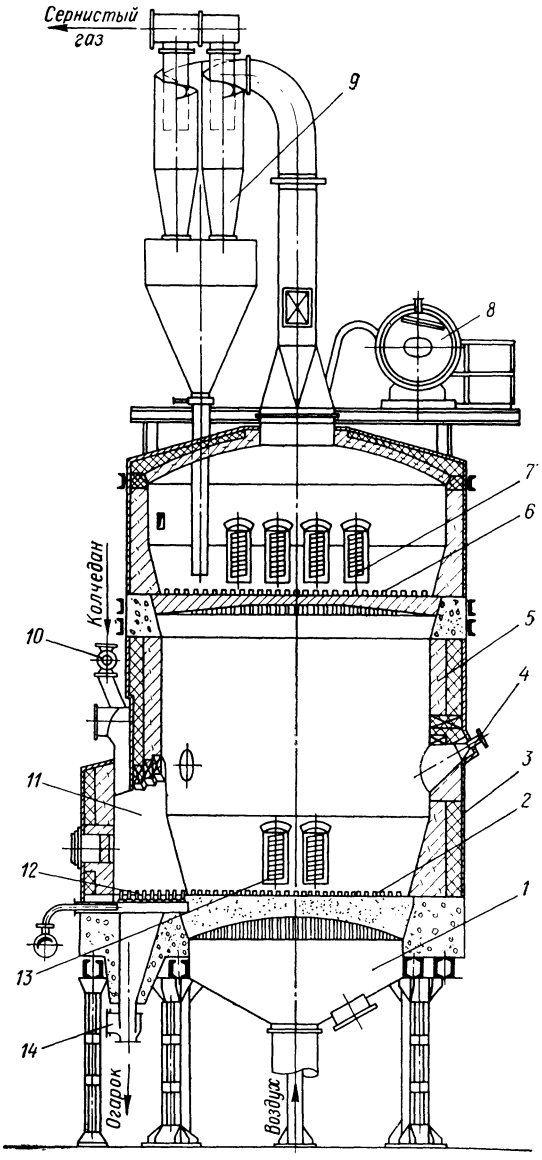


Рис. 6. Печь ДКСМ для обжига колчедана:
1 — дутьевая камера; *2* — беспровальная решетка; *3* — кожух печи; *4* — люк смотровой; *5* — футеровка; *6* — решетка разделительная; *7* и *13* — охлаждающие элементы; *8* —барабан котла; *9* — циклоны возврата; *10* — роторный питатель; *11* — камера загрузочная; *12* — решетка дутьевая, провальная; *14* — затвор выгрузочный.

Принцип работы печи ДКСМ следующий: флотационный колчедан и воздух подаются в нижнюю зону печи, где происходит обжиг колчедана в кипящем слое при 700—800 °С. Обжиговые газы, содержащие огарок, через отверстия газораспределительной решетки поступают в кипящий слой верхней зоны. Запыленный поток газов из верхней зоны печи направляется в циклон возврата огарка. Огарок, уловленный в циклоне, возвращается в верхний кипящий слой. Очищенный от крупных частиц огарка обжиговый газ из циклона направляется для дальнейшей тонкой очистки в электрофильтр ОГ-4-16 и далее направляется для получения серной кислоты. Основное количество огарка (~80%) удаляется из верхнего кипящего слоя через специальное переливное окно. Поддержание требуемых температур в нижней зоне (700—800 °С) и в верхней зоне (450 °С) осуществляется с помощью тепловоспринимающих элементов, устанавливаемых в нижней и в верхних кипящих слоях. Наиболее крупные частицы огарка колчедана, уносимого потоком газа в верхнюю зону печи, выделяются из потока газа из-за снижения скорости в расширенной части печи и создает кипящий слой под верхней газораспределительной решеткой, которую пополняет возвращаемая из циклона мелкая фракция огарка.

При контакте огарка с поверхностью установленных в верхнем слое тепловоспринимающих элементов начинается постепенное падение температуры частиц огарка и обжиговых газов до заданного значения. Понижение температуры в верхней зоне приводит к уменьшению линейной скорости газов и их запыленности.

Основные конструктивные параметры печи ДКСМ производительностью 130 т/сутки приведены ниже.

Нижняя зона

Диаметр:	
воздушной решетки	3,62 м
цилиндрической части	4,62 »
Высота:	
цилиндрической части	3,24 м
конической части	0,83 »
зоны обжига	4,07 »
Площадь:	
форкамеры	2,00 м²
воздушной решетки	12,30 »
Объем зоны обжига	49,23 м³

Верхняя зона

Диаметр:	
газовой решетки	4,80 м
цилиндрической части	4,80 »
Высота:	
зоны охлаждения	2,86 м
Объем зоны	47,30 м³
Параметры решетки:	
диаметр отверстий	23 мм
число отверстий	920 »
шаг между отверстиями	135 »
Свободное сечение решетки	2,11%
Коэффициент запаса скорости провала	1,30

Основные технологические показатели процесса обжига флотационного колчедана в печах ДКСМ приведены ниже.

Производительность:	
проектная	130 т/сутки
действительная	135.7 »
Интенсивность:	
на площадь нижней решетки	11.3 т/(м² · сутки)
на сечение нижней цилиндрической части печи	13,5 »
Интенсивность на объем нижней зоны	2,77 т/(м³ · сутки)
Расход воздуха	13400 м³/ч
Температура:	
нижнего слоя	640 °С
под верхней решеткой	685 °С
верхнего слоя	440 °С
Сопротивление слоя:	
нижнего	6350 Па
верхнего	5200 »
Концентрация SO_2 в газе	14,3 объемн. %
Содержание в огарке:	
серы	1,68 масс. %
меди:	
общей	0,44 масс. %
растворимой	0,44 масс. %
цинка:	
общего	1,00 масс. %
растворимого	0.85 масс. %
Степень выгорания серы	96,8%

Определение скоростей устойчивости слоя и витания частиц огарка. Порозность слоя:

$$\varepsilon_0 = 1 - \gamma_н / \gamma_{каж}$$

где $\gamma_н$ — насыпная масса неподвижного слоя, кг/м³; $\gamma_{каж}$ — кажущаяся удельная масса частиц огарка, кг/м³.

Удельная масса обжигового газа (в кг/м³):

$$\gamma_г \quad \gamma_0 \frac{273}{273 + t_{ср}}$$

Критерий Архимеда для частиц $d_ч$ (в м):

$$Ar - \frac{g d_ч^3}{\gamma^2} \quad \frac{\gamma_{каж} \quad \gamma_г}{\gamma_г}$$

Критерий Рейнольдса, соответствующий скорости предела устойчивости

$$Re_{п\ у} = 0{,}0091 \psi_{п.\ у} Ar$$

где $\psi_{п.\ у} = \varepsilon_0^3 / [\varphi_ф\ (1 - \varepsilon_0)]$ [здесь $\varphi_ф$ — коэффициент формы (для огарка флотационного колчедана равен 44,0)].

Скорость предела устойчивости слоя (в м/с):

$$\omega_{п.\ у} = \frac{\nu\, Re_{п.\ у}}{dr}$$

Критерий Рейнольдса, соответствующий скорости витания частицы:

$$Re_{вит} = 0{,}152\,(\psi_{вит} Ar)^{0{,}715}$$

Скорость витания частицы (в м/с):

$$\omega_{вит} = \frac{\nu\, Re_{вит}}{dr}$$

где ν — кинематическая вязкость, м²/с.

Печи для сжигания серы

Сжигание серы в сернокислотном производстве проводят в печах в распыленном состоянии. Наиболее совершенными и производительными являются циклонные и камерные печи. Каждый тип имеет горизонтальное и вертикальное исполнение.

Сжигание твердой серы производится в полочных печах и печах КС. Сера, используемая в сернокислотном производстве, — высокоактивный элемент; легко испаряется. Удельная масса 1,96—2,69 кг/м³. Теплотворная способность 9295 кДж/кг (при сгорании в SO_2). Сера содержит небольшое количество битумов (~0,2%), золы (0,2% для I сорта и 2% для III сорта), влаги (~0,2%). Кроме того, имеются некоторые механические примеси. Поэтому при производстве серной кислоты сера должна быть достаточно чистой, так как при сжигании неотфильтрованной серы минеральные примеси отлагаются на поверхности змеевиков плавильника, ухудшая условия теплопередачи. Механические примеси засоряют форсунки.

При сжигании серы должно быть полное отсутствие недожога (проскока), нарушающего технологический режим, глубокое регулирование для обеспечения устойчивой работы на всем диапазоне нагрузок и необходима равномерная концентрация сернистого газа.

Печь циклонная. Для сжигания расплавленной серы применяют циклонные печи двух типов: I — однокамерные печи с номинальной производительностью по сжигаемой сере 30, 60 и 100 т в сутки; II — двухкамерные печи с номинальной производительностью по сжигаемой сере 100, 150 и 240 т в сутки.

Конструкция двухкамерной циклонной печи ЦКТИ-НХЗ приведена на рис. 7.

Двухкамерные печи снижают энергетические затраты за счет уменьшения аэродинамического сопротивления печи, представляют возможности работы с предельно низким избытком воздуха, имеют большой диапазон регулирования производительности по сжигаемой сере и т. д. Печи состоят из цилиндрического корпуса с двойной стальной обшивкой, футерованной огнеупорным кирпичом, и аэромеханического пережима. В кольцевое пространство, образованное наружным и внутренними кожухами, поступает воздух, подаваемый на горение серы и охлаждение наружного кожуха печи. Воздух на горение поступает в реакционную камеру через тангенциальные сопла и осевой закручиваемый аппарат с регистром, расположенным в торцевой стенке печи. Для обеспечения постоянства выходных скоростей воздуха при работе на сниженных нагрузках каждое

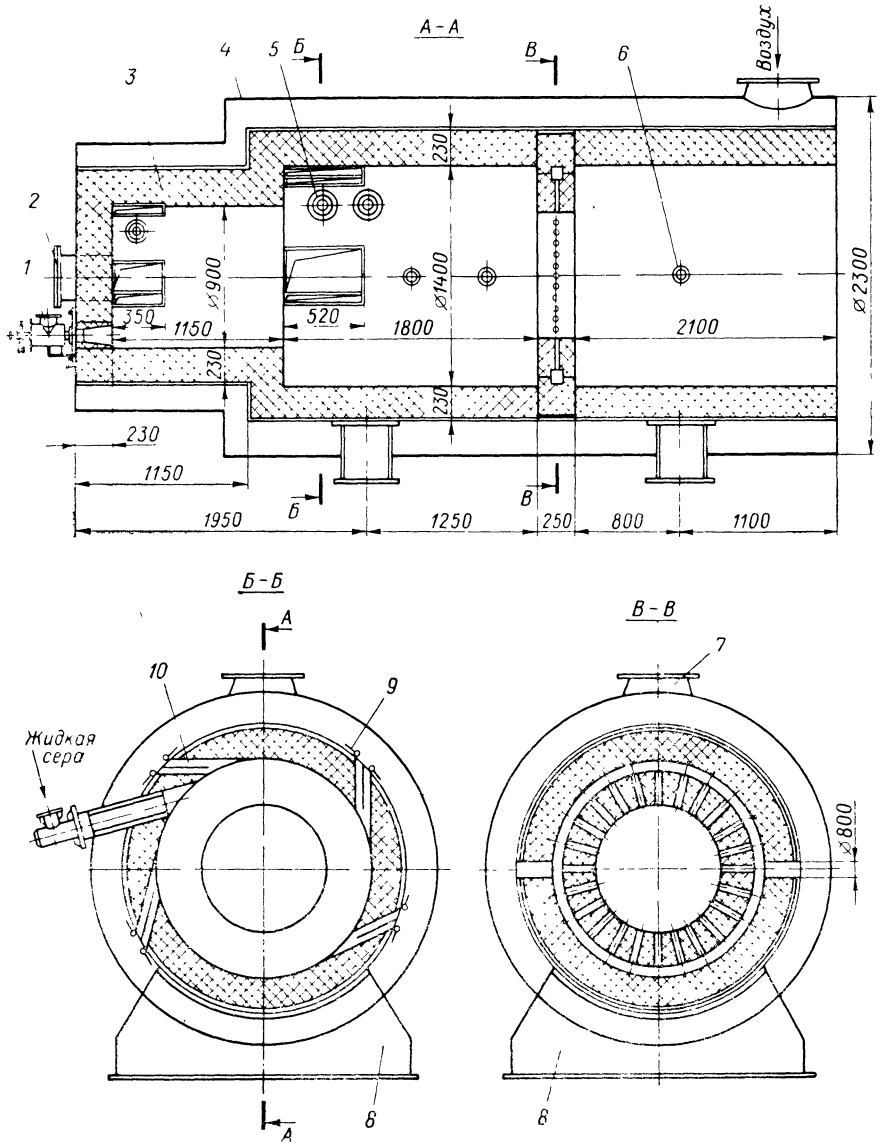


Рис. 7. Печь циклонная для сжигания серы:

1 — форсунка для мазута; *2* — передняя гляделка; *3* — футеровка; *4* — кожух; *5* — форсунка для серы; *6* — боковая гляделка; *7* — патрубок для подвода воздуха; *8* — опора; *9* — заслонка; *10* — форма для воздуха.

тангенциальное сопло разделено на две секции, снабженные отключающими заслонками. Управление заслонками производится посредством тяги, выведенной на торцевую стенку печи.

Подача расплавленной серы на сжигание осуществляется через боковые форсунки, которые установлены радиально; количество их зависит от производительности печи. Сжигание распыленной серы осуществляется в аэродинамическом вращающемся потоке воздуха, вводимого в печь через тангенциальные сопла со скоростью 30—70 м/с. Кроме тангенциальных сопел, воздух подается через регистр осевого закручивающего аппарата и через сопла пережима.

В осевом закручивающем аппарате устанавливается аксиально направленная фронтовая форсунка, предназначенная для растопки печи и работы на сниженных нагрузках.

В вихровом потоке у торцевой стенки однокамерной печи происходит газификация и частичное сгорание серы. Основной процесс горения серы происходит в объеме реакционной камеры перед пережимом.

В топках бо́льших производительностей (тип II) газофикация серы осуществляется в форкамере, а дожигание в основной реакционной камере. В форкамере установлены аксиальная и радиальные форсунки, осевой закручивающий аппарат с регистром и часть тангенциальных воздушных сопел.

Основная реакционная камера печи оборудована радиальными форсунками и тангенциальными воздушными соплами.

Для защиты пережима от воздействия высоких температур в нем имеются радиально расположенные сопла, через которые подается часть дутьевого воздуха.

При работе на номинальной нагрузке с расчетными коэффициентами избытка воздуха ($\alpha = 1{,}15$; SO_2 содержится 18%) и с температурой воздуха $t_{возд} = 60$ °С аэродинамическое сопротивление печи составляет ~2000 Па. При повышении α до 1,3 и $t_{возд}$ до 300 °С аэродинамическое сопротивление печи увеличивается до 3000 Па.

Печи допускают эксплуатацию при нагрузке до 1,25 от номинальной.

Для пуска печи необходимо разогреть внутреннюю поверхность футеровки до 1000 °С, что осуществляется специальным сжигательным устройством, установленным на торцевой стенке печи. Только после нагрева печи включают боковую форсунку, подающую серу, и выключают подачу топлива. Допустимая температура внутреннего кожуха из углеродистой стали 500 °С и из легированной стали 600 °С.

При длительной работе с пониженными нагрузками лишние форсунки удаляют и на их место ставят заглушки. Регулирование нагрузки печи по сере можно производить двумя способами:

1) изменением коэффициента избытка воздуха при постоянном расходе воздуха;

2) изменением расхода воздуха и серы при постоянном коэффициенте избытка воздуха.

При нагрузках ниже 60% оба способа комбинируют: снижается расход серы, расход воздуха и несколько повышается коэффициент избытка воздуха.

Число включенных сопел выбирают от нагрузки печи по сжигаемой сере таким образом, чтобы аэродинамическое сопротивление печи составляло 1700—3500 Па.

Для двухкамерных печей при нагрузке менее 50% от номинальной, весь воздух вводится в форкамеру. При нагрузке 30% от номинального, подача воздуха осуществляется только в регистр осевого закручивающего аппарата.

Регулирование нагрузки печи осуществляется отклонением форсунок либо заменой распылителей при постоянном давлении 0,5—0,6 МПа. Регулирование дросселированием серы не допускается. Краны на линиях подвода серы должны быть открытыми полностью.

Сернистый газ из циклонной печи содержит 16—18% SO_2 при $\alpha = 1{,}15—1{,}2$ и температуре его 1200—1300 °С. Разрежение в печи при пуске должно быть 50—100 Па.

Тепловое напряжение реакционной камеры печи достигает 4,6 Вт/м³.

При сжигании серы в циклонной печи достигается постоянная концентрация сернистого газа, простое регулирование процесса горения серы и его автоматизация.

Конструкция форсунки, устанавливаемой в циклонных печах, рассмотрена на стр. 170, 171.

Методика расчета циклонной печи. *Материальные расчеты.* Расход серы:

$$B = \frac{B_{сут} \cdot 1000}{24}$$

Количество элементарной серы поступает в печь (в кг/ч):

$$G = B\eta$$

где η — содержание серы в натуре.

Количество образующегося сернистого ангидрида (в м³/ч или кг/ч):

$$V_{SO_2} = \frac{G \cdot 22{,}4}{64} \quad \text{или} \quad G_{SO_2} = \frac{G \cdot 64}{32}$$

Объем печного газа при заданной концентрации ангидрида 4 (в м³/ч):

$$V_{п.г} = \frac{V_{SO_2} \cdot 100}{\varphi}$$

Содержание кислорода в печном газе:

$$C_{O_2} = 21 - C_{SO_2}$$

где C_{O_2} и C_{SO_2} — концентрации кислорода и сернистого ангидрида в печном газе, объемн. %.

Количество кислорода в печном газе (в м³/ч или кг/ч):

$$V_{O_2} = \frac{V_{SO_2} \cdot C_{O_2}}{100} \quad \text{или} \quad G_{O_2} = \frac{V_{O_2} \cdot 32}{22{,}4}$$

Количество азота в печном газе (в м³/ч или кг/ч):

$$V_{N_2} = V_{\text{п. г}}(V_{SO_2} + V_{O_2}) \quad \text{или} \quad G_{N_2} = \frac{V_{N_2}}{22{,}4}$$

Количество сухого воздуха, необходимое для сжигания серы (в м³/ч):

$$V_{\text{возд}} = \frac{V_{N_2} \cdot 100}{79}$$

Количество кислорода, поступающее с воздухом в печь (в м³/ч или кг/ч):

$$V_{O_2}^{\text{пост}} = V_{\text{возд}} - V_{O_2} \quad \text{или} \quad G_{O_2}^{\text{пост}} = \frac{V_{O_2}^{\text{пост}} \cdot 32}{22{,}4}$$

Тепловые расчеты. Приход тепла. Количество тепла, поступающее с расплавленной серой (в Вт):

$$Q' = Bc_S t_S$$

где c_S — теплоемкость серы, кДж/(кг·°С); t_S — температура серы, °С.

Количество тепла, поступающее с воздухом:

$$Q'' = V_{O_2}^{\text{пост}} c_{\text{возд}} t_{\text{возд}}$$

где $c_{\text{возд}}$ — теплоемкость воздуха, кДж/(кг · °С); $t_{\text{возд}}$ — температура воздуха, °С.

Количество тепла, выделяющееся при сгорании серы (в Вт):

$$Q''' = Bq$$

где q — количество тепла, выделяющееся при горении 1 кг серы, кДж.

Общий приход тепла (в Вт):

$$Q_{\text{пр}} = Q' + Q'' + Q'''$$

Расход тепла. Количество тепла, уносимое с печными газами (в Вт):

$$Q^{IV} = V_{\text{п. г}} c_{\text{п. г}} t_{\text{п. г}}$$

где $c_{\text{п. г}}$ — теплоемкость печного газа, кДж/(м³ · °С); $t_{\text{п. г}}$ — температура печного газа, °С.

Количество тепла, теряемое в окружающую среду, принимается за 5% от прихода тепла:

$$Q^V = 0{,}05 Q_{\text{пр}}$$

Общий расход тепла (в Вт):

$$Q_{\text{расх}} = Q^{IV} + Q$$

Конструктивный расчет. Определение реакционной камеры печи (в м³):

$$V_{\text{кам}} = Q_{\text{пр}} / V_{\text{напр}}$$

где $V_{\text{напр}}$ — тепловое напряжение в камере, Вт/м³.

Печи камерные. Наиболее распространенными для сжигания серы являются вертикальные и горизонтальные камерные печи.

Жидкая сера сгорает в факеле, который образуется форсунками. На рис. 8 приведена одна из горизонтальных конструкций печей.

Печь представляет собой стальной цилиндр, футерованный огнеупорным кирпичом. В печи установлены две вертикальные

перегородки, имеющие проходы для газа. Эти перегородки делят печь на две зоны: камеру горения и камеры догорания. Серу подают в печь механическими или пневматическими форсунками, установленными в торцевой части печи. Основное количество воздуха, необходимого для горения серы, подают по дутьевому коробу в зону распыления жидкой серы. Дополнительный (вторичный) воздух поступает через специальные фурмы. Сернистый газ выводят через патрубок. Предусматривается также подвод дополнительного воздуха для дожигания паров серы или разбавления и охлаждения печных газов.

Тепловое напряжение камерных печей для сжигания серы составляет $q_V = 100$ кВт/м³.

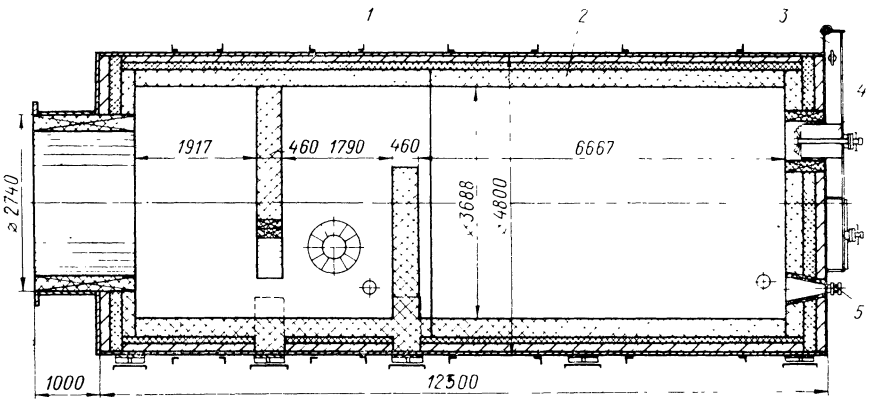


Рис. 8. Печь камерная для сжигания расплавленной серы:
1 — корпус; *2* — футеровка; *3* — кожух для подвода воздуха; *4* — форсунка для серы; *5* — форсунка для мазута.

Отношение длины печи к ее диаметру равно $B = 3—4$; длина печи (в м) определяется по формуле:

$$L = \sqrt[3]{\frac{BV_п}{0{,}785}}$$

где $V_п$ — объем печи, м³.

ПЕЧИ ПРОИЗВОДСТВА СОЛЯНОЙ КИСЛОТЫ

Общие сведения

Технологический процесс получения соляной кислоты разделяется на две стадии: получение хлористого водорода и абсорбция хлористого водорода водой.

Хлористый водород может быть получен несколькими методами: а) действием серной кислоты на хлорид натрия; б) действием сернистого газа на хлорид натрия в присутствии кислорода и водяного пара; в) взаимодействием хлора, водяного пара и угля; г) хлорированием органических соединений; д) прямым синтезом из элементов.

В данной книге будут рассмотрены печи для получения хлористого водорода прямым синтезом и печи для получения хлористого водорода действием серной кислоты на хлорид натрия и попутно сульфата натрия.

Печь синтеза хлористого водорода

Получение соляной кислоты синтезом из элементов позволяет использовать водород, получаемый одновременно с хлором при электролизе водных растворов солей щелочных металлов, и не расходовать на получение соляной кислоты серную кислоту.

Синтез хлористого водорода из чистого хлора и водорода с последующей абсорбцией HCl водой позволяет получить чистую соляную кислоту. Хлористый водород получают сжиганием водорода в струе хлора:

$$H_2 + Cl_2 \rightleftarrows 2HCl + 184{,}6 \text{ кДж}$$

Реакция подчиняется закону действия масс; константа скорости реакции зависит от температуры и выражается уравнением:

$$\lg k = \frac{9586}{T} - 0{,}440 \lg T + 2{,}16$$

Равновесие рассматриваемой реакции сильно сдвинуто вправо. Диссоциация хлористого водорода заметна только при температуре выше 1700 °С. При обычной температуре и отсутствии световых лучей хлор и водород практически не реагируют. Теоретическая температура пламени хлористого водорода при стехиометрическом соотношении хлора и водорода равна 2240 °С. Однако избыток водорода и примесь прочих газов снижает эту температуру до 1000—1200 °С.

Для обеспечения не взрывного горения хлора в струе водорода процесс ведут при небольшом избытке последнего от стехиометрического (3—5%). Необходимость работы с избытком водорода обусловливается и тем, что образующийся на стенках печи хлорид железа $FeCl_2$ может окисляться в хлорид железа $FeCl_3$ в присутствии хлора и кислорода и привести к коррозии стенок печи.

Избыток водорода частично сгорает в печи за счет кислорода, поступающего в печь с хлором и водородом.

Конструкция печи для синтеза хлористого водорода приведена на рис. 9.

Печь двухконусная с естественным воздушным охлаждением. Благодаря тому, что форма печи близка к форме факела пламени, обеспечивается равномерная тепловая нагрузка стенок листовой стали (Ст. 3). Нижняя цилиндрическая часть корпуса и съемное днище футерованы огнеупорным кирпичом. Внизу устанавливается горелка для подвода водорода и хлора. В печи происходит сгорание водорода в струе хлора. Верхний конец печи является взрывным клапаном. Из бокового патрубка на верхней конической части корпуса отводится газообразный хлористый водород.

Водород перед подачей в горелку печи освобождается от влаги охлаждением его до 25—30 °С. Последовательно проходит гравийный

пламягаситель, водоотделитель, гравийный искрогаситель, обратный клапан.

В печи поддерживается давление около 6 кПа. Температура наружной стенки печи достигает 400 °С, а температура отходящего газа перед абсорбционной колонкой должна быть не больше 250 °С. Автоматическое регулирование подачи газов обеспечивает нужное соотношение между хлором и водородом, поступающим в горелку.

Помимо этого, процесс контролируется по цвету пламени, который должен быть молочно-белым. В случае избытка хлора, что недопустимо, цвет пламени приобретает зеленоватый оттенок, при большом избытке водорода — голубой.

Технические газы, используемые для синтеза HCl, должны быть, по возможности, чистыми. Концентрация водорода не должна быть ниже 95%, а концентрация хлора — не ниже 90%. В получаемом газе содержание HCl не должно быть меньше 80%. Производительность описанной печи достигает 10—12 т/сутки 100%-ного хлористого водорода. Расход газов на 1 т 31%-ной соляной кислоты составляет: хлора (100%-ного) 0,305—0,312 т; водорода (100%-ного) 110—112 м³.

Преимуществом этих печей является простота и дешевизна

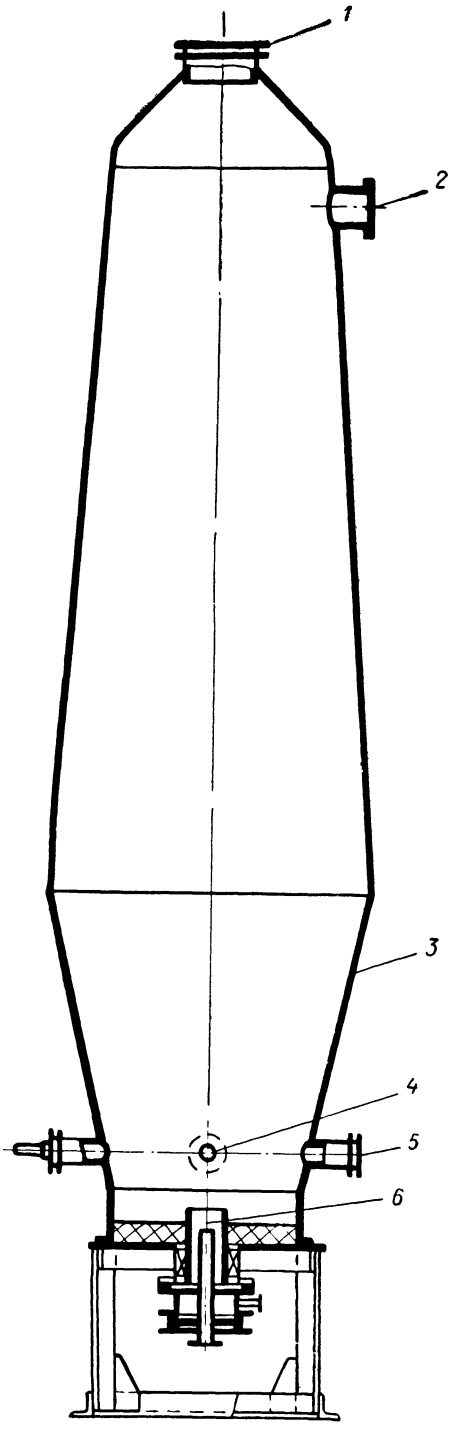


Рис. 9. Печь для синтеза хлористого водорода:

1 — взрывной клапан; *2* — штуцер; *3* — корпус; *4* — люк запальный; *5* — смотровое окно; *6* — горелка.

их изготовления, легкость монтажа и обслуживания. Конструкция горелки подробно описана далее.

Методика расчета печи синтеза хлористого водорода. *Исходные данные.*

1. Производительность печи на 100%-ный хлористый водород кг/сутки — G_{HCl}.

2. Состав технического хлор-газа (в объемн. %):

Cl_2	92,00
O_2	0,63
N_2	2,37
H_2	3,50
CO_2	1,50
Итого	100%

3. Состав технического водорода — газа (в объемн. %):

H_2	97,00
O_2	0,63
N_2	2,37
Итого	100%

Избыток водорода по данным действующих заводов 3%.

Материальные расчеты печи. Расход сырья.

1. Расход 100%-ного хлора определяют из уравнения:

$$G_{Cl_2} = \frac{G_{HCl} M_{Cl_2}}{24 \cdot 2M_{HCl}} \quad \text{или} \quad V_{Cl_2} = \frac{G_{Cl_2}}{\rho_{Cl_2}}$$

где G_{Cl_2} — 100%-ный хлор, кг/ч; M_{Cl_2} — молекулярная масса хлора, кг; M_{HCl} — молекулярная масса хлористого водорода, кг; V_{Cl_2} — объем хлора, м³/ч; ρ_{Cl_2} — плотность хлора, кг/м³.

2. Расход технического хлора (a %) находят из уравнения:

$$V^{т.х}_{Cl_2} = \frac{V_{Cl_2} \cdot 100}{92}$$

где $V^{т.х}_{Cl_2}$ — объем технического хлора, м³/ч.

В этом объеме содержится следующее количество других газов (в м³/ч): кислорода

$$V^{т.х}_{O_2} = \frac{V^{т.х}_{Cl_2} \cdot 0{,}63}{100}$$

азота

$$V^{т.х}_{N_2} = \frac{V^{т.х}_{Cl_2} \cdot 2{,}37}{100}$$

водорода

$$V^{т.х}_{H_2} = \frac{V^{т.х}_{Cl_2} \cdot 3{,}50}{100}$$

углекислого газа

$$V^{т.х}_{CO_2} = \frac{V^{т.х}_{Cl_2} \cdot 1{,}50}{100}$$

3. Расход 100%-ного водорода на синтез хлористого водорода определяют из уравнения:

$$G_{H_2}=\frac{G_{HCl}M_{H_2}}{24\cdot 2M_{HCl}} \quad \text{или} \quad V_{H_2}=\frac{G_{H_2}}{\rho_{H_2}}$$

где G_{H_2} — водород 100%-ный, кг/ч; M_{H_2} — молекулярная масса водорода, кг; V_{H_2} — объем водорода, м³/ч; ρ_{H_2} — плотность водорода, кг/м³.

4. Расход 100%-ного водорода с учетом 3%-ного избытка находят из равенства:

$$G_{H_2}^{изб}=1{,}03G_{H_2} \quad \text{или} \quad V_{H_2}^{изб}=1{,}03V_{H_2}$$

5. Расход 100%-ного водорода с техническим водородом. Часть необходимого водорода поступает с техническим хлор-газом; его должно поступить:

$$V'_{H_2}=V_{H_2}^{изб}-V_{H_2}^{т.\,х}$$

где V'_{H_2} — 100%-ный водород, поступающий на синтез с техническим водородом, м³/ч.

6. Расход технического водорода определяется из уравнения

$$V_{H_2}^{тв}=\frac{V'_{H_2}\cdot 100}{0{,}97}$$

где $V_{H_2}^{тв}$ — технический водород, м³/ч.

В этом объеме содержится (в м³/ч):

кислорода

$$V_{O_2}^{тв}=\frac{V_{H_2}^{тв}\cdot 0{,}63}{100}$$

азота

$$V_{N_2}^{тв}=\frac{V_{H_2}^{тв}\cdot 2{,}37}{100}$$

7. Расход водорода на связывание кислорода. Поступление кислорода: с техническим хлором $V_{O_2}^{т.\,х}$ м³/ч или $G_{O_2}^{т.\,х}$ кг/ч;

с техническим водородом $V_{O_2}^{тв}$ м³/ч или $G_{O_2}^{тв}$ кг/ч.

Расход водорода на образование воды по уравнению:

$$2H_2+O_2=2H_2O$$

$$G_{H_2}^{вода}=\frac{\left(G_{O_2}^{т.\,х}+G_{O_2}^{тв}\right)4{,}032}{32}$$

$$V_{H_2}^{вода}=8$$

где $G_{H_2}^{вода}$ — количество водорода на образование воды.

8. Количество образующейся воды будет равно:

$$G_{H_2O}=\frac{36{,}032\left(G_{O_2}^{т.\,х}+G_{O_2}^{тв}\right)}{32}$$

где G_{H_2O} — количество образующейся воды, кг/ч.

9. Остаток водорода будет равен (в кг/ч или м³/ч):

$$G_{H_2}^{ост}=G_{H_2}^{изб}-G_{H_2}-G_{H_2}^{вода} \quad \text{или} \quad V_{H_2}^{ост}=V_{H_2}^{изб}-V_{H_2}-V_{H_2}^{вода}$$

10. Количество образующегося хлористого водорода:

$$G'_{HCl}=\frac{G_{HCl}}{24} \quad \text{или} \quad V'_{HCl}=\frac{V_{HCl}}{\rho_{HCl}}$$

где G'_{HCl} и V'_{HCl} — масса и объем образующегося хлористого водорода, кг/ч и м³/ч; ρ_{HCl} — плотность хлористого водорода, кг/м³.

Тепловой баланс. Исходные данные.

Производительность печи, кг/ч (в расчете на 100%-ный хлористый водород) . . . . . G'_{HCl}

Количество отходящих газов, кг/ч . . . . . $V_{о.г}$

Состав полученной газовой смеси:

	масс. %	объемн. %
HCl	96.57	95,35
H_2O	0,63	1,20
N_2	1,85	2,40
CO_2	0,93	0,75
H_2	0,02	0,30

Приход тепла:

1. Количество тепла, поступающее с техническим хлором Q_1 (в Вт), определяют из уравнения:

$$Q_1=(G_{Cl_2}c_{Cl_2}+G_{O_2}c_{O_2}+G_{N_2}c_{N_2}+G_{CO_2}c_{CO_2}+G_{H_2}c_{H_2})\,t$$

где G'_{H_2}, G_{O_2}, G_{N_2}, G_{Cl_2}, G_{CO_2} — расход технического хлора, кислорода, азота, углекислого газа, водорода, кг/ч; c_{Cl_2}, c_{O_2}, c_{N_2}, c_{CO_2}, c_{H_2} — теплоемкость газов, кДж (кг·°С); t — температура поступающих газов, °С.

2. Количество тепла, поступающее с техническим водородом Q_2 (в Вт), определяют из уравнения:

$$Q_2=(G_{H_2}c_{H_2}+G'_{O_2}c_{O_2}+G'_{N_2}c_{N_2})\,t'$$

где G'_{H_2}, G'_{O_2}, G'_{N_2} — расход водорода, кислорода, азота, кг/ч; t' — температура поступающих газов, °С.

3. Количество тепла реакции образования хлористого водорода Q_3 определяют из уравнения

$$Q_3=\frac{G_{HCl}\cdot 1000g_{HCl}}{M_{HCl}}$$

где g_{HCl} — количество тепла, выделяющееся при синтезе HCl, кДж/моль; M_{HCl} — молекулярная масса HCl, кг.

4. Количество тепла реакции образования воды Q_4 определяют из уравнения:

$$Q_4=\frac{G_{H_2O}\cdot 1000g_{H_2O}}{M_{H_2O}}$$

где G_{H_2O} — масса образовавшейся воды, т/ч; g_{H_2O} — количество тепла, выделяющееся при образовании воды, кДж/моль; M_{H_2O} — молекулярная масса воды, кг.

Общий приход тепла $Q_{пр}$ (в Вт):

$$Q_{пр}=Q_1+Q_2+Q_3+Q_4$$

Расход тепла:

1. Физическое тепло отходящих газов Q_5 находят из уравнения:

$$Q_5 = G_{HCl} c_{HCl} + (G'_{N_2} + G'_{N_2}) c_{N_2} + G_{CO_2} c_{CO_2} + (G''_{H_2} c_{H_2}) t'' + G_{H_2O} i_{H_2O}$$

где G''_{H_2O} — масса водорода в отходящих газах, кг/ч; c_{HCl} — теплоемкость хлористого водорода, кДж/кг.

2. Потери тепла в окружающую среду Q_6 определяют как разность между приходом тепла и физическим теплом отходящих газов

$$Q_6 = Q_{пр} - Q_5$$

Общий расход тепла $Q_{расх}$:

$$Q_{расх} = Q_5 + Q_6$$

Уравнение теплового баланса имеет следующий вид:

$$Q_{пр} = Q_{расх} \quad \text{или} \quad Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = Q_5 + Q_6$$

Печи муфельные сульфатсоляные

Печи предназначены для промышленного производства хлористого водорода и попутно сульфата натрия. Этот метод основан на взаимодействии серной кислоты с хлоридом натрия, в результате которой удаляется газообразный хлористый водород и сульфат натрия. Реакция в печи протекает по следующему уравнению:

$$2NaCl + H_2SO_4 = Na_2SO_4 + 2HCl \quad -Q$$

Так как реакция эндотермическая, то к реагирующим материалам необходимо подводить тепло.

Получение хлористого водорода и сульфата натрия осуществляется в муфельных механических печах, где обогревающие дымовые газы непосредственно не соприкасаются с реагирующими веществами, так как тепло передается через стенку муфеля и поэтому получается хлористый водород более чистый и более высокой концентрации.

В качестве сырья применяют хлорид натрия, содержащий:

	в %
Хлорид натрия	96,5
Прочие включения и нерастворимый осадок	3,5

и серную кислоту:

	в %
H_2SO_4	92,5
H_2O	7,5

В результате реакции получают:

1. Хлористый водород, содержащий 83% HCl и 17% водяного пара.

2. Сульфат натрия, содержащий:

	в %		в %
Na_2SO_4	94	NaCl	1,3
H_2SO_4	1,3	Прочие	3,4

Для получения 1 т 27,5% соляной кислоты расходуется сырья:

485 кг . . . . . 100%-ной NaCl
405 кг . . . . . 100%-ной H_2SO_4

Применяемые в промышленности сульфатсоляные печи имеют различную конструкцию в зависимости от вида используемого топлива. На рис. 10 приведена сульфатсоляная печь на газовом топливе. Печь состоит из керамического муфеля-реактора, имеющего круглую форму и выполненного из фасонных огне- и кислотоупорных шамотных или карборундовых блоков. Толщина блоков чаши 120 мм, а свод муфеля для улучшения теплопередачи имеет толщину 30 мм.

Муфель заключен в огнеупорную футеровку, имеющую каналы, по которым движутся дымовые газы, обогревающие муфель с реагирующими в нем материалами. Внутренняя футеровка выполнена из шамотного кирпича, а наружная — из глиняного (красного) кирпича.

Футеровка печи для герметизации заключена в сварной металлический кожух из листовой стали. Механическая прочность печи осуществляется сварным каркасом из профильного проката. Над печью к каркасу приварена площадка для обслуживания загрузочных устройств.

Хлорид натрия через загрузочную трубу из дозатора непрерывно поступает в муфель. Туда же по трубе из дозатора поступает серная кислота на распределитель кислоты «гусек», который укреплен на головке вала и вращается вместе с ним. «Гусек» имеет форму чайника, через носик которого кислота сливается на хлорид натрия в муфеле.

Перемешивание NaCl и H_2SO_4 и передвижение по поду муфеля от центра к периферии до разгрузочного отверстия осуществляется мешалкой с четырьмя плечами, расположенными крестообразно. На каждом плече имеется по два термосилидовых или чугунных грибка с керамическими или карборундовыми наконечниками (ножами, зубьями). Мешалка укреплена на чугунном валу, который приводится в движение механизмом привода, расположенным под печью. Вал делает 0,75—1,25 об/мин.

Получаемый в результате реакции газообразный хлористый водород с температурой 375—400 °С через прямоугольное отверстие на боковой стенке покидает реакционную камеру и направляется на абсорбцию водой. Сухой хлористый водород, выходящий из печи, имеет концентрацию только 30—40%. При хорошем уплотнении муфеля концентрация хлористого водорода в газе может быть повышена до 50% и выше.

Низкая концентрация хлористого водорода в газах вызвана тем, что внутри муфеля поддерживается вакуум 10—20 Па (во избежание попадания в атмосферу цеха газа — хлористого водорода), происходит подсос в муфель воздуха из цеха и дымовых газов из каналов.

Газ HCl из муфельной печи загрязнен парами серной кислоты, сульфатной пылью, летучими соединениями мышьяка, переходящими из серной кислоты.

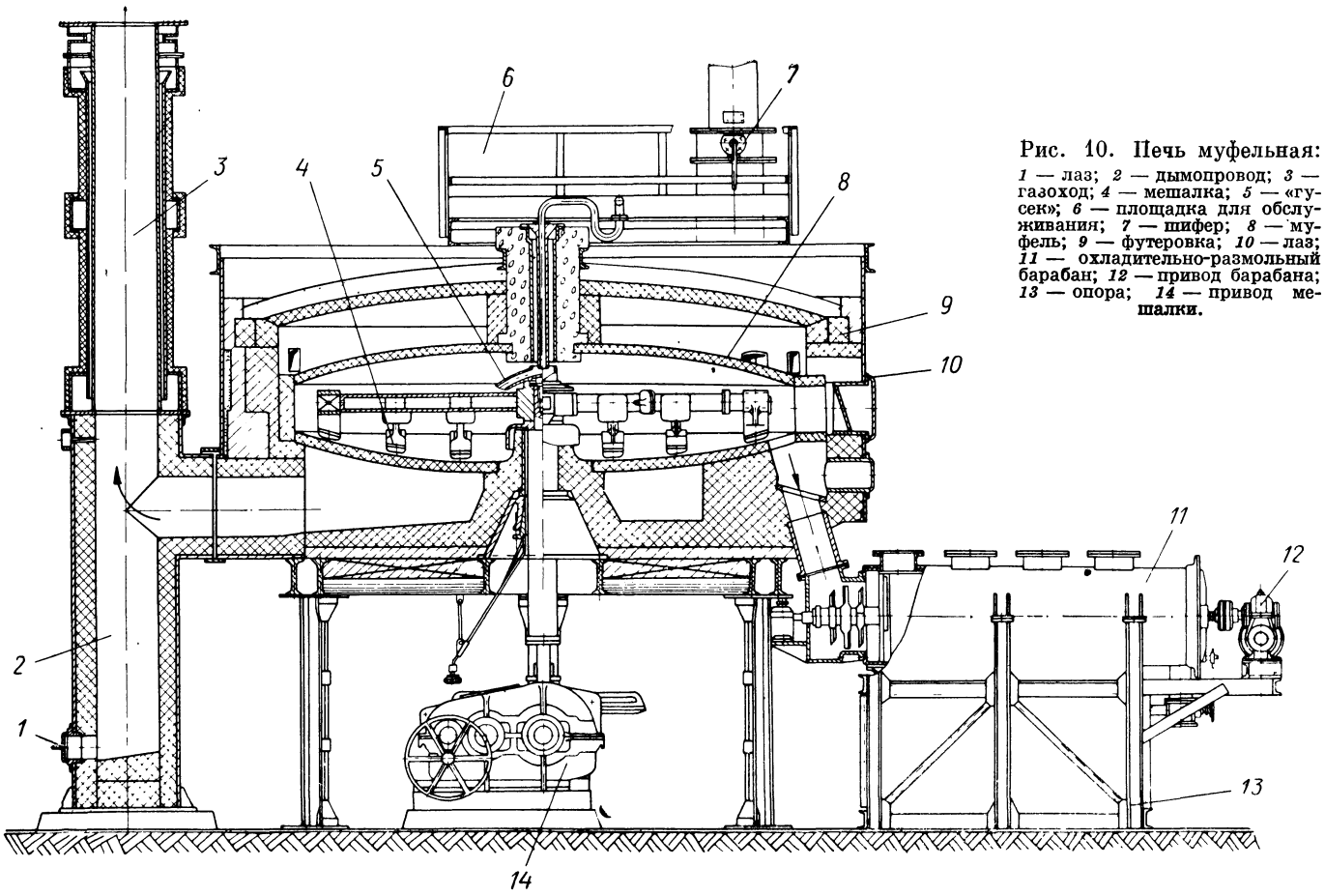


Рис. 10. Печь муфельная:
1 — лаз; *2* — дымопровод; *3* — газоход; *4* — мешалка; *5* — «гусек»; *6* — площадка для обслуживания; *7* — шифер; *8* — муфель; *9* — футеровка; *10* — лаз; *11* — охладительно-размольный барабан; *12* — привод барабана; *13* — опора; *14* — привод мешалки.

Другой продукт реакции — сульфат натрия, имеющий температуру 500 °С, через круглое отверстие по поду муфеля покидает печь и поступает в размольно-холодильный барабан. Последний выполняется чугунным с водяной рубашкой и имеет поверхность охлаждения 2,8 м².

Сульфат натрия, проходя по барабану, размельчается и охлаждается до 90 °С и через бункер выгружается на транспортное устройство. Вода, поступающая на охлаждение с температурой 26 °С, нагревается до 36 °С. Сульфат натрия при нормальном режиме перед выходом из печи имеет лимонно-желтый цвет в отличие от серого, характерного для «сырого» сульфата, полученного при низкой температуре в муфеле.

Нагрев реакционной массы до 550—600 °С осуществляется дымовыми газами, которые имеют температуру над муфелем 1200 °С, под муфелем 800 °С. Дымовые газы получаются в результате сжигания природного газа. Приготовление горючей газовоздушной смеси производится в двухпроводных горелках типа ГНП. Для обеспечения равномерного нагрева муфеля установлено четыре горелки. Требуемая температура теплоносителя достигается разбавлением дымовых газов в горелочной туннеле вторичным воздухом, подаваемым специальным вентилятором.

Дымовые газы с температурой 800 °С через дымовые каналы покидают печь и проходят через радиационный рекуператор, охлажденные выбрасываются через трубу в окружающую атмосферу. Нагретый воздух из рекуператора направляется в горелки.

Система дымопроводов выполнена таким образом, что позволяет работать без рекуператора.

Производительность сульфатсоляной печи зависит от размеров муфеля, от числа оборотов вала, температуры в муфелях и других условий. При диаметре муфеля 5,5 м печь дает 12—14 т в сутки сульфата натрия. Выработка сульфата натрия составляет 0,59—0,64 т на 1 т 27,5%-ной соляной кислоты.

Сульфатсоляные печи работают в очень жестких условиях, детали ее подвергаются действию агрессивной среды при высокой температуре. Это вызывает необходимость их ежегодной остановки на ремонт.

Муфельный свод имеет срок службы 10 лет, а под муфеля может работать до 3 лет.

ПЕЧИ ПРОИЗВОДСТВА ТЕРМИЧЕСКОЙ ФОСФОРНОЙ КИСЛОТЫ

Общие сведения

Термическая фосфорная кислота H_3PO_4 является одной из наиболее широко применяемых кислот фосфора.

Производство термической фосфорной кислоты сжиганием жидкого фосфора (двухступенчатый способ) во всех своих разновидностях включает следующие технологические процессы: сжигание жидкого фосфора; охлаждение газов, гидратацию и абсорбцию окислов фос-

фора; конденсацию фосфорной кислоты и улавливание туманообразной кислоты.

Окисление фосфора, независимо от особенностей башен сжигания, во всех схемах производится кислородом воздуха:

$$P_4 + 5O_2 = P_4O_{10} \quad +23\,610 \text{ кДж/кг}$$

Если окисление фосфора осуществлять недостаточным количеством кислорода, то образующийся фосфорный ангидрид будет содержать некоторое количество нежелательных примесей низших окислов фосфора. Чтобы исключить их образование, а также чтобы проводить

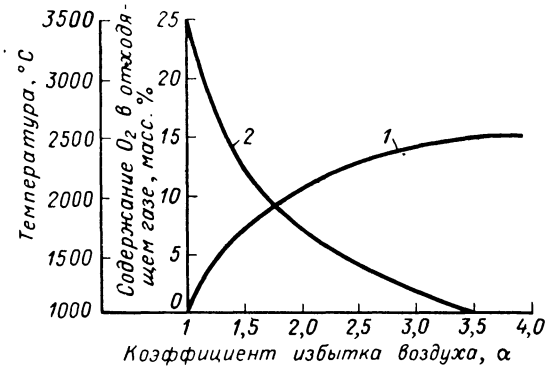


Рис. 11. Зависимость содержания кислорода в отходящих газах (кривая *1*) и температура горения фосфора (кривая *2*) от коэффициента избытка воздуха.

процесс при определенной температуре, необходим избыток кислорода, который выражают через коэффициент избытка воздуха α. Зависимость температуры горения фосфора от коэффициента избытка воздуха, а также содержания кислорода в отходящих газах приведена на рис. 11.

В производстве термической фосфорной кислоты коэффициент избытка воздуха принимают 1,75—2,0, что соответствует содержанию кислорода в отходящих газах 10—13 масс. % и температуре горения фосфора 1800—2100 °С.

Гидратация окислов фосфора парами воды, поступающей в газы из орошающей жидкости, непосредственно связана с конденсацией фосфорной кислоты и образованием тумана и протекает по уравнению:

$$P_4O_{10} + 6H_2O = 4H_3PO_4$$

Эти процессы и охлаждение газов объединяются во вторую стадию производства, которая аппаратурно может быть совмещена с первой — сжиганием фосфора.

Улавливание тумана фосфорной кислоты производится в различных аппаратах, где разделение фаз происходит механически или под влиянием разности потенциалов.

Универсальным охлаждающим агентом в промышленных установках является вода, обладающая высокой теплоемкостью. Применение воды для этой цели объединяет операции охлаждения и гидратации в единый производственный узел. Учитывая исключительную гигроскопичность фосфорного ангидрида и устойчивость при высоких температурах, процессы охлаждения и гидратации объединены.

Печь для сжигания фосфора

Печь-башня (рис. 12) предназначена для сжигания жидкого фосфора, гидратации фосфорного ангидрида циркуляционной фосфорной кислотой с целью увеличения ее концентрации и охлаждения газов.

Основными конструктивными элементами башни сжигания фосфора являются: а) корпус башни с футеровкой; б) переливная чаша с крышкой; в) коллектор для отвода теплой воды; г) установка, подводящая воздух на горение фосфора; д) опора для установки; е) форсунка для сжигания фосфора; ж) трехходовой водяной змеевик; з) кольцевые коллекторы; и) форсунки для орошения циркуляционной фосфорной кислоты.

Корпус башни сжигания имеет вертикально-коническую форму, изготовленную из сварной углеродистой стали и футерованную внутри полиизобутиленом, диабазовой плиткой, кислотоупорным кирпичом с разделкой швов замазкой «арзамит». Форма башни обеспечивает равномерный сток по стенам циркуляционной фосфорной кислоты. К качеству футеровочных работ предъявляются строгие требования: укладка плиток и разделка швов между ними должны исключить возможность проникновения кислоты к кожуху башни. Наружная поверхность футеровки должна быть гладкой, так как неровности приводят к отрыву пленки кислоты от поверхности стенок, что нарушает защиту футеровки от воздействия раскаленных газов. Высота корпуса башни равна 11 800 мм. Внутренний диаметр верха 5300 мм, и он должен значительно превосходить поперечные размеры факела фосфора для предохранения футеровки от соприкосновения с ним. Внутренний диаметр низа равен 4500 мм. На корпусе башни предусмотрены отверстия для установки четырех каскадных форсунок, патрубок для отвода газов в башню гидратации и патрубок слива фосфорной кислоты в сборную емкость.

Переливную чашу с крышкой приваривают к верхней части корпуса и используют для приготовления циркуляционной фосфорной кислоты необходимой концентрации разбавлением водой поступающей кислоты из пластинчатых теплообменников. Переливная чаша имеет штуцера для ввода циркуляционной кислоты и охлажденной воды. Приготовленная циркуляционная кислота, переливаясь через внутреннюю стенку чаши, стекает, образуя тонкую пленку и обеспечивает интенсивное снятие тепла от излучения факела горящего фосфора, предохраняя верхнюю поверхность футеровки от разрушения. Равномерная пленка фосфорной кислоты по всей внутренней поверхности корпуса башни достигается строго горизонтальной установкой переливной чаши.

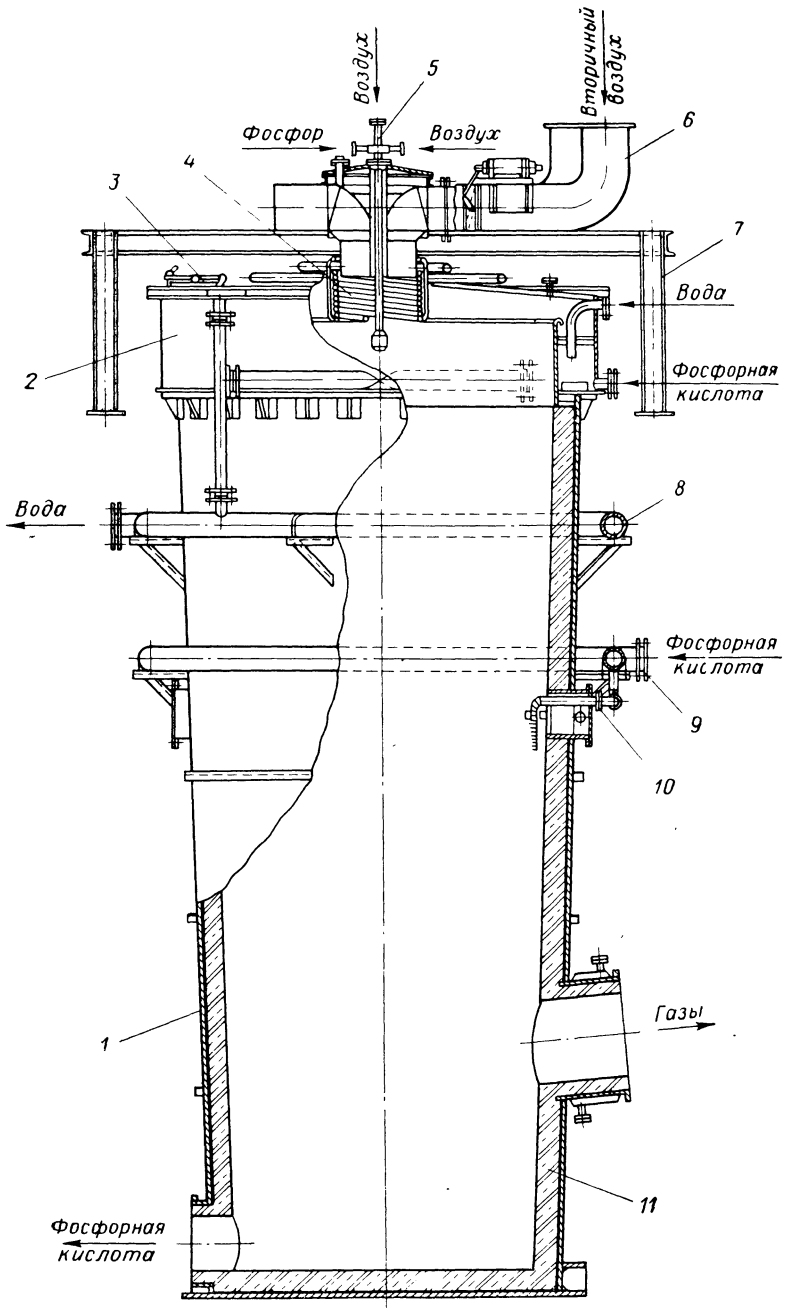


Рис. 12. Печь-башня для сжигания жидкого фосфора:

1 — кожух; *2* — переливная чаша с крышкой; *3* — люк; *4* — трехходовый змеевик; *5* — форсунка для сжигания фосфора; *6* — установка, подводящая воздух на горение; *7* — опора; *8* — коллектор воды; *9* — коллектор кислоты; *10* — форсунка каскадная; *11* — футеровка.

На переливную чашу приварена круглая крышка, выполненная из кислотоупорной стали, которая во избежание воздействия высоких температур охлаждается водой из двух кольцевых коллекторов. Теплая вода стекает по крышке в сборник воды и через кольцевой коллектор направляется на сборник оборотной воды. В центре крышки имеется отверстие, в которое вставляется патрубок от улитки установки подводящего воздух и трехходовой водяной змеевик для дополнительного охлаждения пространства вокруг форсунки для сжигания фосфора.

Установку, подводящую воздух на горение фосфора, монтируют на крышке переливной чаши и используют для засасывания воздуха из цеха на горение фосфора за счет разрежения в башне сжигания. Воздушный короб имеет форму улитки для придания вращательного движения воздуху вокруг форсунки. Количество засасываемого воздуха регулируется специальным клапаном с пневмоприводом, что позволяет автоматически создавать необходимый избыток воздуха. На улитке установлен люк. В центре улитки приварена труба с фланцем для установки форсунки для сжигания фосфора. Установка для подвода воздуха покоится на специальной металлической опоре, которая крепится к перекрытию цеха.

Форсунка для распыливания фосфора имеет производительность по распыливаемому фосфору равную 2500 кг/ч. Распыливание фосфора производится сжатым воздухом под давлением 0,6 МПа. Подробно о форсунках для распыливания фосфора описано далее.

Форсунка каскадная предназначена для распыливания циркуляционной фосфорной кислоты с целью гидратации фосфорного ангидрида и охлаждения газов. Каскадные форсунки устанавливаются ниже уровня факела горения фосфора.

ПЕЧИ ПРОИЗВОДСТВА ПЛАВИКОВОЙ КИСЛОТЫ

Общие сведения

Раствор фтористого водорода (HF) в воде называют плавиковой кислотой.

Промышленный способ производства фтористого водорода основан на взаимодействии фторида кальция с серной кислотой:

$$CaF_2 + H_2SO_4 = CaSO_4 + 2HF \quad -Q$$

В результате реакции образуется гипс и газ — фтористый водород.

Кроме основной реакции протекают и побочные, так как в концентрате плавикового шпата имеется ряд примесей, которые также реагируют с серной кислотой.

Обогащенный флотацией плавиковый шпат имеет следующий состав: 95—97% CaF_2, 1,5—2% SiO_2, 1,5—3% примесей ZnS, Al_2O_3, $CaCO_3$, Fe_2O_3.

Кремнезем с фтористым водородом в печи реагирует согласно уравнению:

$$SiO_2 + 4HF = SiF_4 + 2H_2O$$

Примеси реагируют с серной кислотой по следующим реакциям:

$$ZnS + H_2SO_4 = H_2S + ZnSO_4$$

$$CaCO_3 + H_2SO_4 = CaSO_4 + H_2O + CO_2$$

$$Al_2O_3 + 3H_2SO_4 = Al_2(SO_4)_3 + 3H_2O$$

$$Fe_2O_3 + 3H_2SO_4 = Fe_2(SO_4)_3 + 3H_2O$$

Реакция разложения плавикового шпата — реакция эндотермическая. Чем выше температура процесса, тем полнее и быстрее идет реакция, однако при значительном повышении температуры реакции начинается испарение серной кислоты и продукционный газ обогащается ее парами, а это в дальнейшем приводит к увеличению содержания серной кислоты в плавиковой кислоте, что весьма нежелательно.

Оптимальная температура реакции, при которой достаточно полно идет основная реакция и содержание серной кислоты в плавиковой не превышает установленного предела, определена УНИХИМом. Так как непосредственно замерить температуру реакционной массы внутри печи весьма трудно, о температуре реакции судят косвенно — по температуре продукционного газа, выходящего из печи. Температура газа на выходе из печи установлена 130—150 °С для печей с наружным обогревом и 160—180 °С для печей с внутренним обогревом.

Время пребывания реакционной массы в печи должно быть достаточным, чтобы заданные в единицу времени количества плавикового шпата и серной кислоты прореагировали до пределов, предусмотренных нормами технологического регламента. Из практики эксплуатации плавиковых печей установлено, что время прохождения массы через печь 60—80 мин обеспечивает полное разложение фторида кальция.

Для получения фтористого водорода применяются вращающиеся печи следующих конструкций: а) печи с наружным обогревом и б) печи с внутренним обогревом противоточные и прямоточные.

Печь плавиковая с вращающимся барабаном и наружным обогревом

Печи с наружным обогревом применяются для получения чистой плавиковой кислоты повышенной концентрации. Конструкция такой печи приведена на рис. 13.

Барабан печи изготовляют цилиндрической формы сварным из 16—18-миллиметровой стали и располагают наклонно в сторону разгрузки под углом 2° к горизонту. В передней части барабана для предохранения его от износа устанавливают рубашку (тоже цилиндрический барабан), прилегающую вплотную к его стенкам. Для крепления рубашки внутри барабана параллельно к его крыше-деке почти вплотную приваривают диск. Одним концом рубашка приварена к диску, а другим — к корпусу барабана. К обоим концам барабана

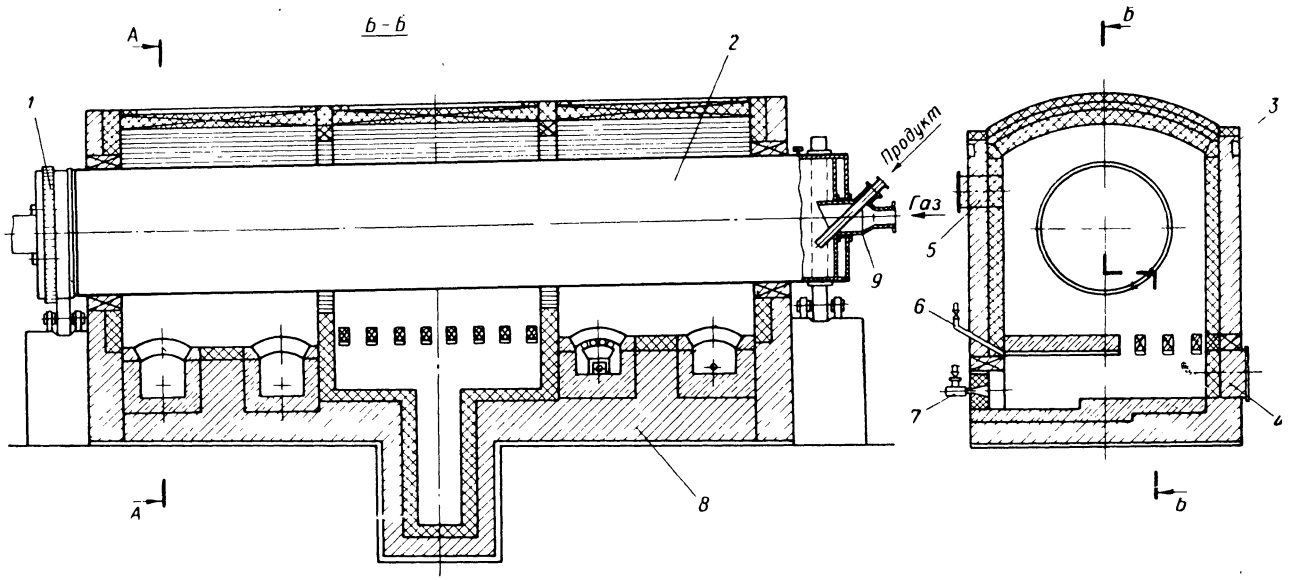


Рис. 13. Печь плавиковая с вращающимся барабаном с наружным обогревом:

1 — приводной механизм; *2* — барабан; *3* — каркас; *4* — лаз; *5* — взрывной клапан; *6* — воздухопровод; *7* — горелка; *8* — футеровка; *9* — загрузочная труба.

приварены фланцы для крепления стальных крыш-дек с ребрами жесткости. Крыша-дека со стороны загрузки называется передней, а со стороны разгрузки — задней. Барабан установлен на две опоры; одна из них одновременно является и упорной. Вращение барабана осуществляется механизмом привода, установленным под барабаном со стороны разгрузки. Опорно-упорные станции и механизм привода крепятся болтами к бетонному фундаменту.

Реакционная масса из смесителя в печь загружается через загрузочную головку, расположенную в центре передней крышки. Опоры загрузочной головки опираются на швеллерные балки, которые прикреплены к вертикальным стойкам, установленным на бетонные фундаменты.

Корпус загрузочной головки отливают из чугуна; он представляет собой два цилиндра разных диаметров, соединенных конусным переходом. Корпус входит одним концом в сальниковое кольцо в центральном отверстии передней крышки; сальниковое кольцо приварено к диску. К переднему концу головки крепится трубопровод для транспортирования продукционного газа, имеющего температуру 130—150 °С. Загрузочная головка имеет сверху прилив с фланцем, куда вставляется патрубок, по которому реакционная масса стекает в барабан печи. Фланец патрубка и корпуса головки соединены болтами, что обеспечивает герметизацию соединения.

Для предотвращения подсоса воздуха в барабан печи (чтобы не разбавлять продукционный газ) между загрузочной головкой печи и ее крышкой имеется сальниковое уплотнение. Сальниковая набивка располагается между сальниковым кольцом и наружной поверхностью загрузочной головки и прижимается грунд-буксой.

Реакционная масса, проходя через печь, нагревается, вследствие чего протекают химические реакции, отходом которых является гипс. Последний выгружают из печи улиткой. Улитка зачерпывает гипс по мере поворота печи и выгружает его в транспортную трубу. Один конец улитки закреплен в печи, а другой находится в транспортной трубе.

Назначение транспортной трубы — транспортирование гипса из печи за пределы здания печного отделения и герметизация печи при разгрузке его. В транспортной трубе происходит также некоторое охлаждение гипса, и поэтому при разгрузке и транспортировании меньше выделяется газов.

Внутри транспортной трубы наварена винтообразная стальная лента, благодаря которой гипс перемещается из одного конца трубы в другой. Транспортная труба при помощи фланца крепится к задней крышке барабана. Другой конец транспортной трубы заварен. У конца трубы, на ее боковой поверхности, имеется люк, через который разгружается гипс. Транспортная труба вращается на одной паре опорных роликов. Когда труба поворачивается отверстием вниз, люк открывается и через это отверстие гипс высыпается в подставленную под него вагонетку. При дальнейшем вращении отверстие поднимается и люк автоматически его закрывает.

Нагрев реакционной массы во вращающемся барабане осуществляется в специальной нагревательной камере передачей тепла косвенно через корпус барабана теплопроводностью.

Нагревательная камера имеет прямоугольную форму с лучковым сводом и состоит из рабочей зоны, в которой проводится нагрев барабана с реакционной массой, и зоны подготовки теплоносителя. Рабочая зона футерована шамотным кирпичом класса Б, теплоизолирована красным и диатомовым кирпичом. Зона подготовки теплоносителя футерована шамотным кирпичом класса А и теплоизолирована красным кирпичом.

В конце зоны подготовки теплоносителя свод выложен не сплошным, а с щелями по 116 мм, через которые теплоноситель поступает в рабочую зону, огибает барабан и проходит вдоль барабана к каналам в середине нагревательной камеры, собирается в сборный боров и покидает печь. Равномерность нагрева барабана с реакционной массой осуществляется дымовыми газами, полученными от сжигания природного газа и разбавленным вторичным воздухом до 500—600 °С в четырех горелочных камерах. Горячая газовоздушная смесь приготовляется в четырех горелках типа ГНП.

В торцевых стенах нагревательной камеры имеются круглые отверстия для прохождения вращающегося барабана. Зазор между кладкой и барабаном равен от 1 до 3 мм. На боковой стене нагревательной камеры над горелками предусмотрены 4 прямоугольных взрывных клапана, закрытые асбестовым листом. В стенах печи предусмотрены отверстия для установки приборов КИП и автоматики.

Печи с наружным обогревом имеют ряд недостатков:

1. Так как теплопередача реакционной массе производится через стенки барабана, то футеровать изнутри и защищать его от коррозии нельзя, что уменьшает срок службы барабана до 12 — 18 месяцев;
2. Невозможность использования теплоносителя с высокой температурой, так как топочные газы сразу выбрасываются в атмосферу;
3. Ограниченность длины барабана из-за двух опорных станций, расположенных между нагревательной камерой;
4. Наличие громоздкой нагревательной камеры;
5. Необходимость большого избытка серной кислоты для полного разложения фторида кальция.

Печь плавиковая с вращающимся барабаном и внутренним обогревом

Процесс разложения фторида кальция серной кислотой наиболее целесообразно проводить в печах по принципу прямотока. При прямотоке реакционная масса попадает сразу в зону горения природного газа, где температуру продуктов сгорания поддерживают 1000—1200 °С, реакция здесь только начинается и тепла на ее проведение требуется много. Реакция между CaF_2 и H_2SO_4 при избытке тепла идет интенсивно уже на первых метрах по длине печи. Непрореагировавших CaF_2 и H_2SO_4 в реакционной массе становится все меньше, поэтому расход тепла на реакцию также уменьшается, и оставшегося

тепла, которое несет с собой газ даже с низкой температурой, достаточно для окончания реакции.

В конце печи температура отходящих газов 180—200 °С, температура гипса еще ниже 180 °С и отгонка серной кислоты из гипса не происходит. Отношение $HF : H_2SO_4$ составляет 20—21, что значительно выше, чем при обжиге по принципу противотока.

Для проведения технологического процесса применяют вращающуюся печь общего назначения. Барабан печи изнутри имеет двойную футеровку. Половина печи со стороны загрузки футеруется двумя слоями: первый — кислотоупорный кирпич на андезитовой замазке, второй — угольные блоки 150 × 150 × 50 мм укладываются насухо. Вторая половина печи футеруется огнеупорными кирпичами. К обоим концам барабана приварены фланцы с ребрами жесткости для крепления крыш-дек.

Загрузочный конец печи состоит из стальной крыши-деки, которая крепится к фланцу барабана и при работе печи вращается вместе с ним. В центре крыши имеется отверстие, куда вставляется неподвижная загрузочная головка. Крышу футеруют кислотоупорным кирпичом.

Загрузочная головка с горелкой установлены на металлическую конструкцию, которая опирается на четыре катка и по рельсам может откатываться от печи. Перед откаткой должны быть отсоединены питательный, газовый и воздушный патрубки.

Горелка закреплена на металлоконструкцию и входит в печь. На горелке имеется крышка загрузочной головки. На крыше-деке имеется также отверстие, через которое в печь входит труба для подачи реакционной массы и предусмотрены отверстия для наблюдения за горением и ходом реакции. Для уплотнения невращающейся крышки-головки и вращающейся деки устанавливается фланец. Кольцеобразные выступы фланца скользят по обечайке крышки-головки и создают уплотняющий лабиринт.

Разгрузочная головка не вращается и состоит из металлической рамы, на которую закреплена труба диаметром 1120 мм; на половину длины труба входит через центральное отверстие деки в печь. Внутри печи в трубу врезан приемный бункер для гипса. Нижний бункер переходит в течку и выходит из печи наружу. Продукционный газ удаляется из патрубка. Конструкция разгрузочной головки приведена на рис. 14.

Тепло для проведения реакции получается от сжигания природного или генераторного газа непосредственно в реакционной камере печи. Горючая газовоздушная смесь приготовляется в двухпроводной горелке.

Преимущество печей с внутренним обогревом:

1. Значительно выше коэффициент использования тепла из-за прямого контакта реакционной массы с дымовыми газами;

2. Наличие кислото- и огнеупорной футеровки значительно удлиняет срок эксплуатации печей;

3. Незначительный унос тепла с отходящими газами из-за низкой его температуры;

4. Большая производительность печи;
5. Низкая температура корпуса барабана, что создает хорошие условия для эксплуатации опорных роликов, бандажей и приводов;
6. Легкое удаление гипса из печи.

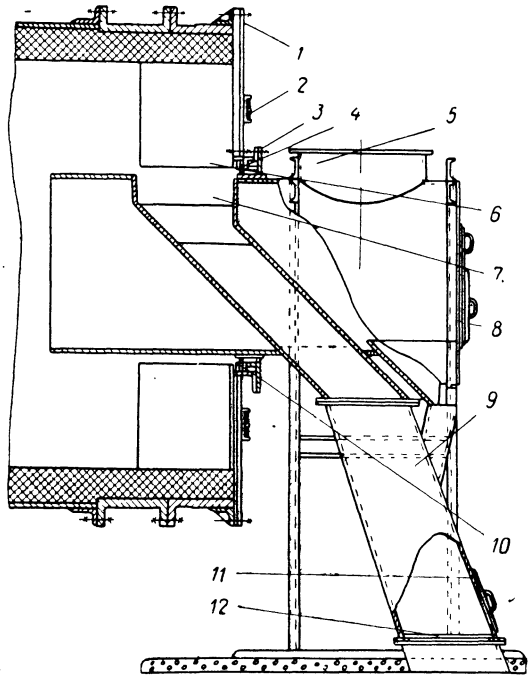


Рис. 14. Разгрузочный конец печи:
1 — фланец; *2* — окно для чистки ковшей с люком; *3* — уплотнительное кольцо; *4* — наружное уплотнительное кольцо; *5* — патрубок для присоединения газохода продукционного лаза; *6* — ковш для разгрузки гипса; *7* — приемный бункер гипса; *8* и *11* — люки; *9* — течка для гипса; *10* — внутреннее уплотнительное кольцо; *12* — решетка.

При эксплуатации печи с внутренним обогревом получают плавиковую кислоту с концентрацией 30—31% HF и 1,2 ÷ 1,4% H_2SO_4. Такая кислота полностью удовлетворяет требованиям производства фторидов.

ПЕЧИ ПРОИЗВОДСТВА КАЛЬЦИНИРОВАННОЙ СОДЫ

Общие сведения

Кальцинированную соду получают прокаливанием сырого бикарбоната натрия, содержащего 13—17% воды, примесей хлоридов аммония 0,7—0,8% и натрия 0,3—0,4%, в содовых печах:

$$2NaHCO_{3\,тв} \longrightarrow Na_2CO_{3\,тв} + CO_{2\,г} + H_2O_п \quad -125{,}37\ кДж$$

Вместе с основной реакцией в печи происходит также разложение углеаммонийных солей, которые можно описать следующими уравнениями:

$$NH_4HCO_{3\,тв} \longrightarrow NH_{3\,г} + CO_{2\,г} + H_2O_п \quad -172{,}66\ кДж$$

$$NH_4Cl_{раств} + NaHCO_{3\,тв} \longrightarrow NaCl_{тв} + NH_{3\,г} + CO_{2\,г} + H_2O_п \quad -151{,}61\ кДж$$

Отходящий газ из содовой печи, имеющий высокое содержание CO_2, используют на карбонизацию и поэтому технологический процесс проводят в герметизированном вращающемся барабане.

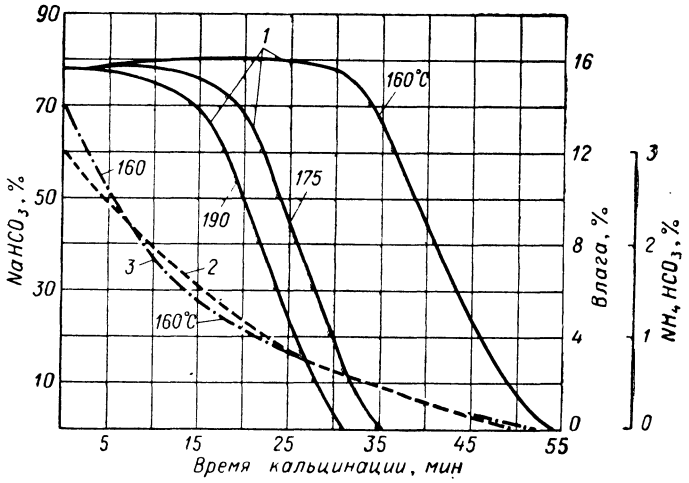


Рис. 15. Зависимость скорости разложения $NaHCO_3$ и испарения воды от температуры:
1 — разложение $NaHCO_3$; *2* — разложение NH_4HCO_3; *3* — испарение воды.

Скорость разложения бикарбоната натрия зависит от температуры и парциальных давлений газообразных CO_2, NH_3 и H_2O над твердой фазой; эта зависимость приведена на рис. 15.

В настоящее время применяют два способа производства кальцинированной соды:

1. Безретурный, при котором сырой бикарбонат натрия забрасывается в содовую печь на созданную заранее содовую подушку;
2. Ретурный, при котором кальцинации подвергают смесь бикарбоната с карбонатом натрия.

Ретурный способ кальцинации вызван тем, что сырой бикарбонат натрия приваривается к горячей стенке содовой печи и образует корку, которая ухудшает теплопроводность в слое и ведет к перегреву стенок барабана и как следствие к его деформации.

Для уменьшения влажности бикарбоната натрия до 8% его смешивают с горячим карбонатом натрия (ретурной содой), выходящей

из печи. Оптимальное соотношение между ретурной содой и сырым бикарбонатом натрия можно определить по следующей формуле:

$$A = 2{,}944Б/В$$

где A — масса ретурной соды на 1 масс. ч. бикарбоната натрия; $Б$ — влажность сырого бикарбоната натрия, %; $В$ — содержание Na_2CO_3 в ретурной соде, %; 2,944 — количество Na_2CO_3, вводимое с ретурной содой на 1% влажности сырого бикарбоната натрия, т.

В производстве соды применяются известково-обжигательные печи и содовые.

Содовая печь

Основным агрегатом для кальцинации соды является вращающаяся содовая печь. Конструкции печи производительностью 215 т/сутки приведена на рис. 16 и 17.

Реакционной камерой является барабан, сваренный из листовой стали толщиной 32 мм, барабан имеет диаметр 2,8 м и длину цилиндрической части равной 24,5 м. Обогреваемая поверхность барабана 205 м² (рис. 18). К обоим концам барабана приварены конусы длиной 1,27 м: передней считается часть барабана со стороны загрузки. К узким горловинам конусов устанавливаются специальные чугунные кольца, к которым крепятся бандажи с диаметром 2,8 м и изготовлены из стального литья с профилем шаровой формы. Ширина бандажа 0,4 м. Внутри барабана установлена цепь, предназначенная для очистки поверхности стенки от налипших соды и бикарбоната натрия. Цепь при вращении барабана разбивает образующиеся комки и способствует их передвижению вдоль барабана с одновременным перемешиванием. Цепь представляет собой массивную конструкцию, состоящую из отдельных звеньев шарнирно связанных между собой. В зависимости от условий работы цепи ее звенья различны по конструкции (рис. 19 и 20).

Звенья цепи стальные имеют форму четырехугольной рамки, у которой две противоположные стороны скошены под углом 60° к основанию. К скошенным сторонам звеньев с обеих сторон крепятся ножи и зубья. Крепление цепи производится при помощи шаровых шарниров. Цепь во время вращения барабана располагается в виде дуги. К концевым чугунным кольцам крепятся, с одной стороны, загрузочная горловина печи, с другой, — выгрузочный шнек.

Барабан содовой печи опирается бандажом на две пары опорных роликов. Диаметр роликов 1100 мм и имеет фасонный профиль, соответствующий профилю бандажа. Такая конструкция роликов позволяет подвигаться вдоль осей, вместе с подвижным, передним концом барабана содовой печи. Оси передних роликов длиннее осей задних роликов, что позволяет свободно передвигаться барабану в сторону загрузки.

Подшипники опорных роликов выполнены с охлаждением и автоматической смазкой. Подшипники закреплены на опорных плитах, являющихся одновременно водяной ванной. В ванны на поверхности воды заливают немного машинного масла для смазки трущихся

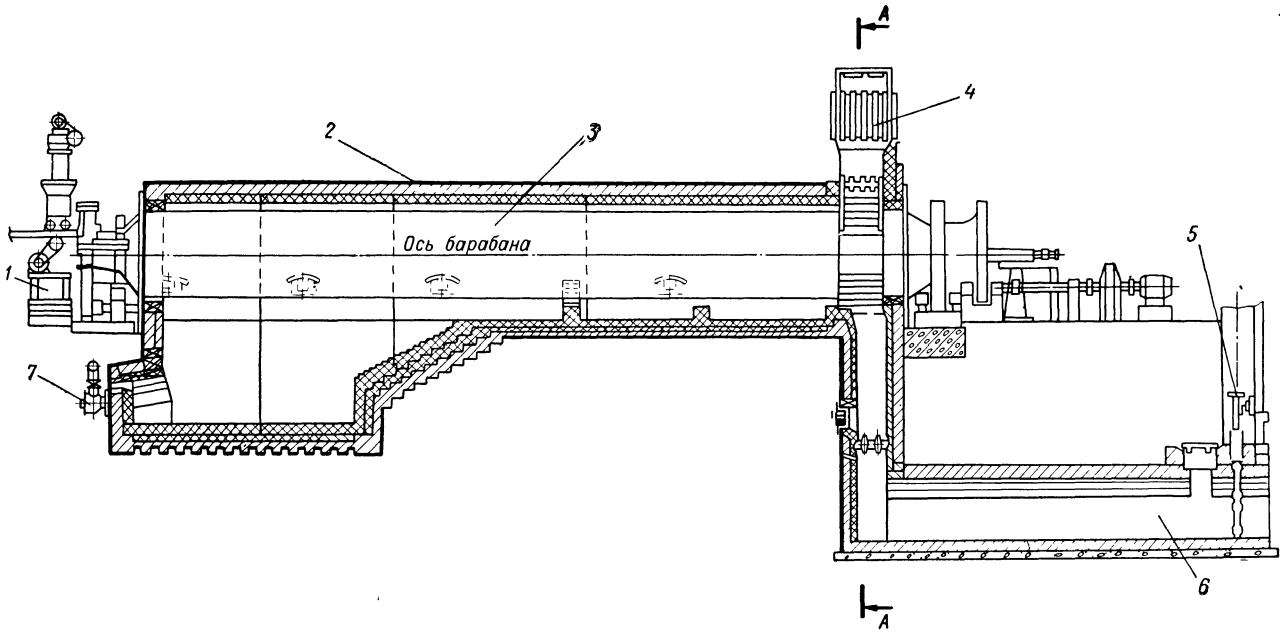


Рис. 16. Содовая печь (продольный разрез):

1 — механизм загрузки; *2* — футеровка; *3* — барабан; *4* — рекуператор; *5* — шлифер; *6* — боров; *7* — горелка.

поверхностей (бандажей и роликов). Опорные плиты крепятся к железобетонным фундаментам.

Вращение барабана осуществляется механизмом привода, состоящим из электродвигателя, редуктора, малой шестерни, находящейся в зацеплении с большой венцовой шестерней. Венцовая шестерня закреплена к горловине конусной части барабана печи со стороны выгрузки.

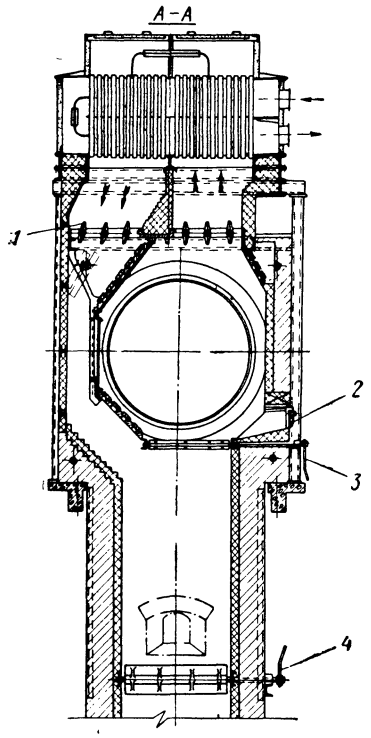


Рис. 17. Поперечный разрез (*А — А*) содовой печи:

1 — направляющие заслонки; *2* — люк; *3* — заслонки; *4* — регулирующая заслонка.

Загрузка печи осуществляется забрасывателем бикарбоната или смесью сырого бикарбоната и карбоната натрия при ретурном питании, конструкция которого приведена на рис. 21.

Питатель выполнен в виде овальной камеры из серого чугуна. На верхней части имеются два ввода для бикарбоната и карбоната натрия. Поступаемые продукты увлекаются большими барабанами, вращающимися навстречу друг другу. Количество бикарбоната, подаваемого питателем, определяется величиной зазора между поверхностями большого и малого барабана, вращающимися навстречу друг другу. Величина зазора регулируется с помощью суппорта. Слой бикарбоната, захваченного между большим и малым барабанами питателя, снимается с их поверхности специальными ножами, очищающими поверхность барабана.

Подачу карбоната натрия регулируют изменением величины зазора между поверхностью большого барабана и плоскостью регулятора подачи.

Карбонат и бикарбонат натрия ссыпаются в закрытый желоб смесителя, в котором имеется два параллельных вала с лопастями, закрепленными по винтовой линии. Валы смесителя вращаются навстречу друг другу, перемешивают лопастями карбонат с бикарбонатом натрия, создавая однородную смесь, которая перемещается вдоль желоба и через загрузочное отверстие поступают в барабан содовой печи.

При безретурном питании применяется забрасыватель.

Выгрузочное устройство содовой печи состоит из цилиндрического сита с закрепленными по образующимся сита торцами и шнека. Шнек приводится в движение приводной звездочкой от основного приводного механизма.

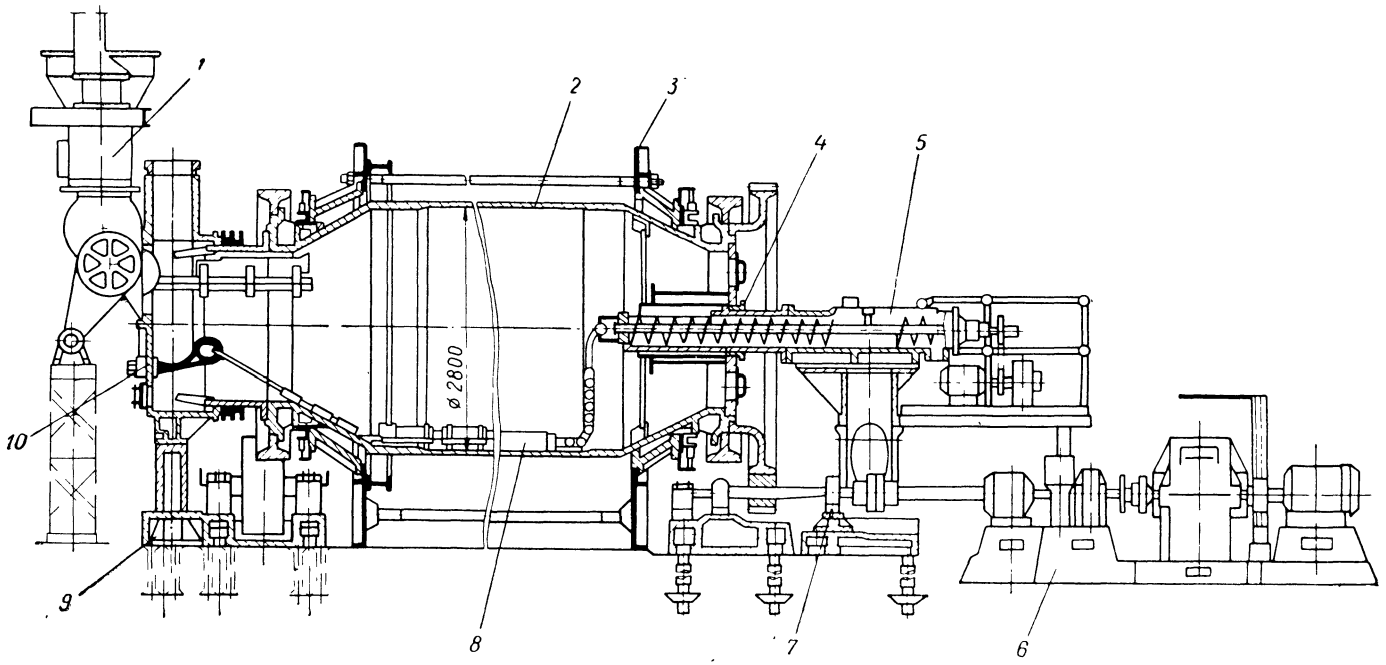


Рис. 18. Барабан диаметром 2,5 м; $L = 23$ м:

1 — мешалка с приводом; *2* — корпус печи; *3* — фронтальные плиты с уплотнениями; *4* — уплотнение выхода шнека; *5* — шнек разгрузочный с приводом; *6* — главный привод; *7* — опора задняя; *8* — цепь в сборе; *9* — опора передняя; *10* — загрузочное устройство.

Как загрузочное, так и выгрузочное устройство одновременно являются и затворами, препятствующими проникновению воздуха в реакционную камеру.

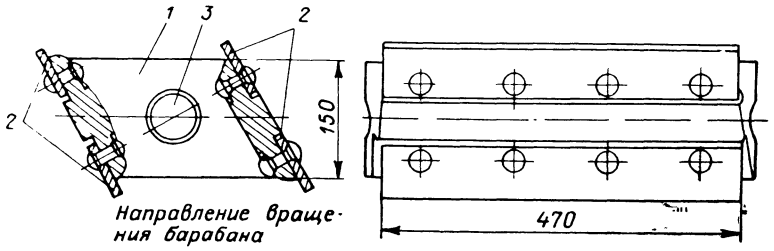


Рис. 19. Малое звено цепи:
1 — корпус звена цепи; *2* — планки; *3* — отверстия для соединительных болтов.

Нагрев бикарбоната натрия или смеси осуществляется передачей тепла через корпус барабана дымовыми газами, полученными от сжигания природного газа или мазута.

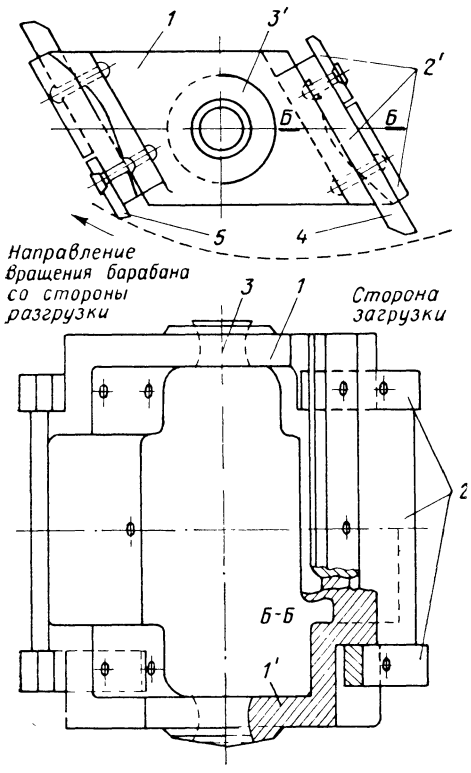


Рис. 20. Тяжелое звено цепи:
1 — корпус звена; *2* — планки; *3* — отверстие для соединительных болтов; *4* — ножи; *5* — зубья.

Вращающийся барабан печи заключен в нагревательную камеру. В передней части печи под барабаном расположена открытая камера горения топлива. В торце нагревательной камеры установлены сжигательные устройства для приготовления топливновоздушной смеси.

Объем и конфигурация камеры горения рассчитаны на сжигание 800 кг мазута или 900 м³ природного газа в час.

Передняя, выдвинутая, часть камеры горения образует форкамеру, способствующую созданию устойчивого факела. Свод форкамеры полуциркульный, наклонный.

Горящий факел можно наблюдать через три гляделки во фронте нагревательной камеры. Обмуровка камеры горения выполнена в два слоя: внутренний шамотный толщиной 232 мм и наружный из красного кирпича. Боковые стенки для придания им устойчивости

сделаны наклонными. По длине камера горения занимает примерно 40% длины барабана. На этом участке тепло передается барабану в основном путем излучения факела и нагретых стенок топки.

В переднюю часть барабана забрасывается сырой бикарбонат натрия и здесь особенно необходим интенсивный подвод тепла. Далее

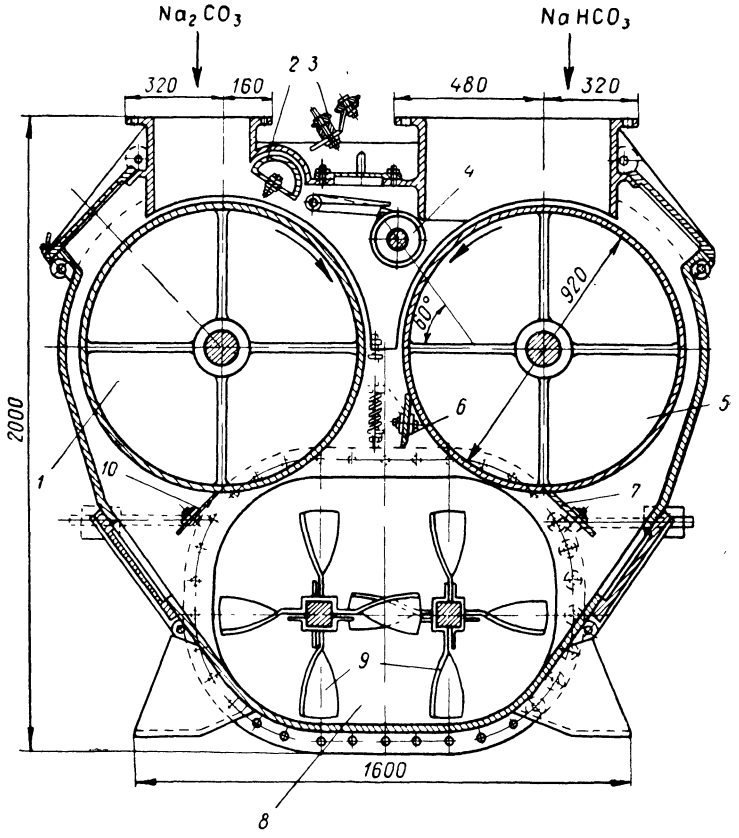


Рис. 21. Питатель и смеситель содовых печей:
1 — большой барабан питателя соды; *2* — регулятор подачи Na_2CO_3; *3* — суппорт малого барабана; *4* — малый барабан питателя для $NaHCO_3$; *5* — большой барабан питателя для $NaHCO_3$; *6*, *7* и *10* — ножи для очистки поверхности барабанов; *8* — смеситель; *9* — лопасти.

нагревательная камера постепенно переходит в кольцевой газоход, внутри которого помещается барабан. На этом участке тепло от газов передается барабану в основном путем конвекций, чему благоприятствуют большая скорость газов, вызванная сужением газохода и завихрением потока при обтекании переходов.

Температура газов за барабаном равна ~500 °С и объем его составляет 14 000 м³/ч. Уходящие газы проходят через трубчатый рекуператор и подогревают воздух, поступающий на горение топлива до 150 °С. Поверхность нагрева рекуператора 160 м². Разрежение в камере горения 20 Па, а за барабаном 50 Па.

Система шиберов позволяет включать рекуператор в работу или выключать его, не прерывая работы печи. Подогрев воздуха дает экономию топлива до 10%.

Футеровка нагревательной камеры выполнена в два слоя: внутренний из огнеупорного шамотного кирпича, наружный из красного кирпича. Над барабаном футеровка переходит в полуциркульный свод в два оката: внутренний шамотный и наружный из красного кирпича. Свод сверху засыпан диатомовой крошкой.

Во внутренней шамотной кладке имеются температурные швы, позволяющие расширение футеровки без повреждения. Для наблюдения и очистки барабана в футеровке с обеих сторон сделаны смотровые окна. В стенке камеры горения имеется лаз, заложенный насухо.

Футеровка нагревательной камеры заключена в металлический каркас из двутавровых балок. К ним приварены рамы для крепления дверек. Подпятовые балки, воспринимающие распор сводов, закладываются в кладку и к стойкам каркаса не привариваются.

Стойки каркаса соединены между собой при помощи стяжных болтов и угольников, окаймляющих верх футеровки. В футеровке, вдоль нагревательной камеры, проложены тяги, связывающие фронтальные (торцевые) плиты барабана. Тяги состоят из отдельных штанг, соединенных стяжными муфтами на резьбе. В местах расположения муфт в кладке сделаны выемки. Футеровка нагревательной камеры покоится на железобетонном фундаменте.

Дымовые газы отводятся из печи через горизонтальные борова в дымовую трубу и выбрасываются в атмосферу.

Получение из барабана печи газа высокой концентрации CO_2 требует сведения до минимума подсоса воздуха в него, что достигается путем тщательной герметизации узла загрузки и выгрузки специальными уплотняющими устройствами. Герметизации также подлежат места прохождения барабана через футеровку нагревательной камеры. Для этого к переднему и заднему концам футеровки прикреплены чугунные плиты, так называемая броня, которые служат дополнительными торцевыми стенками футеровки. Между барабаном и броней имеется уплотнение, выполненное из стального кольца с пружинами.

Режим кальцинации *. Нормальный процесс кальцинации протекает при следующем составе бикарбоната натрия (в %):

$NaHCO_3$	82—84
NaCl	0,2—0,4
H_2O	13—15

Выход карбоната натрия из такого бикарбоната натрия составляет 52—54%. Выпускаемый продукт должен иметь Na_2CO_3 не менее 95%. Содержание Na_2CO_3 в готовой кальцинированной соде может колебаться, однако при определении производительности содовой печи она должна быть пересчитана на 95%-ную соду.

* Кальцинация — устаревший термин, означающий озоление.

Качество получаемой кальцинированной соды в значительной степени зависит от температуры, с которой ее выгружают из печи. Эта температура не должна выходить за пределы 140—190 °С. При выгрузке соды из печи при более низкой температуре влажность ее превышает норму, сода получается более пушистой, с малой объемной массой, при более высокой температуре связано с увеличением расхода топлива, а при температуре выше 250 °С получается перекаленная сода, которую трудно выгружать из печи. Температура соды на выходе из печи зависит от количества подаваемого в нее бикарбоната натрия, от его влажности, от режима топки.

Для уменьшения подсоса воздуха и потерь CO_2 содовая печь должна быть достаточно герметичной, механизмы загрузки и выгрузки материалов в печь должны обеспечивать не попадание в печь воздуха и выбивание газов из нее.

Очень важно поддерживать постоянное давление газов в печи, так как наличие вакуума неизбежно сопровождается подсосом воздуха и уменьшением концентрации CO_2, а повышение давления приводит к потерям его.

Состав и количество газов, выделяющихся при кальцинации бикарбоната натрия, зависит от его состава и достигаемой степени кальцинации в печи, количества засасываемого воздуха. Необходимо чтобы разложение бикарбоната натрия протекало как можно полнее, так как при недостаточной кальцинации содержание CO_2 в газах заметно понижается.

Данные эксплуатации показали, что в передней части содовой печи происходит постепенный подогрев сырого бикарбоната натрия и испарение воды. Основная масса бикарбоната натрия разлагается с образованием соды во второй половине содовой печи, где этот процесс и завершается.

Одним из важнейших показателей режима работы содовой печи является величина удлинения барабана. Поэтому на каждой печи установлен автоматический указатель, передающий величину удлинения барабана на циферблат. Максимально допустимое удлинение барабана 80 мм, что равно средней температуре барабана 270 °С.

Недостаток или избыток бикарбоната натрия в печи сказывается на температуре выходящей соды и соответственно на удлинении барабана. При недостаточной подаче бикарбоната натрия в печь удлинение барабана возрастает выше допускаемой нормы.

Подача избыточной ретурной соды в печь будет балластом, ухудшающим теплопередачу в слой смеси и уменьшающим полезный объем печи, поэтому количество ретурной соды, подаваемой в печь, должно быть равно расчетному.

Методика расчета содовой печи. Расчет содовой печи состоит из определения производительности печи, составления материального и теплового балансов процесса кальцинации.

Расчет производительности содовой печи (СП). Производительность печи определяют по удельной производительности — съему соды с 1 м² обогреваемой поверхности, которой является поверхность цилиндрической части СП. При

диаметре печи 2,8 м и длине обогреваемой части 23,5 м производительность печи будет равна

$$G_c = \pi DLg = 3{,}14 \cdot 2{,}8 \cdot 23{,}5 \cdot 1{,}05 = 215 \text{ т/сутки}$$

где G_c — производительность печи, т/сутки; D — внутренний диаметр СП, м; L — длина цилиндрической части барабана СП, м; g — удельная производительность [т/(м² · сутки)] по данным эксплуатации равна 1,05 т/(м² · сутки).

Материальный баланс процесса, протекающего в содовой печи, необходим для определения количества сырого бикарбоната натрия для получения в результате реакции заданного количества соды и определения количества и состава отходящих газов. В печь поступает сырой бикарбонат натрия примерно следующего состава (в %):

$NaHCO_3$	81,55
NH_4HCO_3	3,7
H_2O	14,2
NaCl	0,4

Данные анализа кальцинированной соды из печи следующие (в %):

Общая щелочность (в пересчете на Na_2CO_3)	98,0
Потеря массы при прокаливании	0,95
Остальные примеси (NaCl, $CaCO_3$, $MgCO_3$, Na_2SO_4) . . .	1,05

Реакция разложения протекает по уравнению:

$$\underbrace{2NaHCO_3}_{168} \longrightarrow \underbrace{Na_2CO_3}_{106} + \underbrace{H_2O}_{18} + \underbrace{CO_2}_{44}$$

Потеря массы при прокаливании составляет 0,95%, следовательно содержание $NaHCO_3$ будет равно:

$$\frac{0{,}95 \cdot 168}{44+18} = 2{,}57\%$$

Содержание Na_2CO_3 в сыром бикарбонате натрия составит:

$$100 - (2{,}57 + 1{,}05) = 96{,}38\%$$

Следовательно 1 т кальцинированной соды содержит 963,8 кг Na_2CO_3 и 25,7 кг $NaHCO_3$. Для получения 1 т кальцинированной соды в печь должно быть подано $NaHCO_3$:

$$\frac{963{,}8 \cdot 168}{106} + 25{,}7 = 1553{,}1 \text{ кг}$$

Так как сырой бикарбонат натрия содержит 81,55% $NaHCO_3$, то его требуется:

$$\frac{1553{,}1 \cdot 100}{81{,}55} = 1904{,}5 \text{ кг}$$

На каждую тонну полученной кальцинированной соды в печь должно быть подано 1901,5 кг сырого бикарбоната натрия.

Гигроскопической влаги в сыром бикарбонате натрия поступает:

$$\frac{1904{,}5 \cdot 14{,}2}{100} = 270{,}4 \text{ кг}$$

В соответствии с уравнениями реакции диссоциации $NaHCO_3$ и NH_4HCO_3 подсчитывается количество твердых и газообразных продуктов, образующихся в процессе кальцинации. При этом необходимо помнить, что из 1533,1 кг $NaHCO_3$,

поступающих в печь, диссоциирует только 1527,4 кг, а 25,7 кг остаются неразложенными. Поэтому расчет ведут следующим образом:

$$Na_2CO_{3\,тв} \ldots \frac{1527{,}4 \cdot 106}{168} = 963{,}8 \text{ кг}$$

$$H_2O_п \ldots \frac{1527{,}4 \cdot 18}{168} = 163{,}6 \text{ кг}$$

$$CO_2 \ldots \frac{1527{,}4 \cdot 44}{168} = 399{,}9 \text{ кг}$$

Полный материальный баланс содовой печи (на 1 т кальцинированной соды) при безретурном ее питании следующий:

Приход			Расход		
компоненты	кг	%	компоненты	кг	%
$NaHCO_3$	1553,1	81,55	Твердые компоненты:		
NH_4HCO_3	70,5	3,70	$NaHCO_3$	25,7	2,57
NaCl	7,6	0,40	Na_2CO_3	963,8	96,38
H_2O	270,4	14,20	NaCl	7,6	0,76
Прочие твердые примеси	2,9	0,15	прочие твердые примеси	2,9	0,29
			Итого:	1000	100,0
			Газообразные компоненты:		
			CO_2	439,2	48,5
			в том числе из:		
			$NaHCO_3$	399,9	44,2
			NH_4HCO_3	39,3	4,3
			NH_3	15,2	1,7
			водяной пар	450,1	49,1
			в том числе из:		
			гидроскопической влаги;	270,4	29,9
			$NaHCO_3$	163,6	18,1
			NH_4HCO_3	16,1	1,8
			Итого:	904,5	100,0
Всего:	1904,5	100,0	Всего:	1904,5	100,01

Тепловой баланс составляется на полную производительность содовой печи.

Приход тепла:

1. Количество тепла, получаемое от сжигания природного газа, Q_1 (в Вт) определяется по формуле:

$$Q_1 = BQ_н^р$$

где B — расход природного газа, м³/ч; $Q_н^р$ — теплотворность природного газа, кДж/м³.

2. Количество тепла, вносимое сырым бикарбонатом натрия, Q_2 (в Вт) составит:

$$Q_2 = Gct$$

где G — количество сырого бикарбоната натрия, кг/ч; c — теплоемкость сырого бикарбоната натрия, кДж/(кг·°С); t — температура загружаемого бикарбоната натрия, °С.

3. Количество тепла, вносимое природным газом, Q_3 (в Вт) рассчитывают по уравнению

$$Q_3 = Bc_г t_г$$

где $c_г$ — теплоемкость природного газа, кДж/(м³·°С); $t_г$ — температура поступающего природного газа, °С.

4. Количество тепла, вносимое воздухом на горение и разбавление дымовых газов, Q_4 (в Вт) определяют из уравнения:

$$Q_4 = V_{возд} c_{возд} t_{возд}$$

где $V_{гозд}$ — объем воздуха, поступающего на горение природного газа и разбавление дымовых газов, м³/ч; $c_{возд}$ — теплоемкость воздуха, кДж/(м³·°С); $t_{возд}$ — температура воздуха, °С.

Расход тепла:

1. Количество тепла, расходуемое на разложение $NaHCO_3$ и NH_4HCO_3, Q_5 (в Вт) определяют из уравнения:

$$Q_5 = G'g$$

где G' — количество диссоциирующего бикарбоната натрия, кг/ч; g — тепло на диссоциацию бикарбоната натрия, кДж/кг.

2. Количество тепла, уносимое с готовой содой, Q_6 (в Вт) определяют из уравнения:

$$Q_6 = G'' c_с t_с$$

где G'' — количество готовой соды, кг/ч; $c_с$ — теплоемкость соды, кДж/(кг·°С); $t_с$ — температура соды.

3. Количество тепла, уносимое отходящими газами из барабана печи, Q_7 (в Вт) находят из уравнения:

$$Q_7 = V_{о.г} c_{о.г} t_{о.г}$$

где $V_{о.г}$ — объем отходящих газов из барабана, м³/ч; $c_{о.г}$ — теплоемкость отходящих газов, кДж/(м³·°С); $t_{о.г}$ — температура отходящих газов, °С.

4. Количество тепла, затрачиваемое на испарение гигроскопической влаги, Q_8 (в Вт) рассчитывают по уравнению:

$$Q_8 = G_{вл} i_{вл}$$

где $G_{вл}$ — количество гигроскопической влаги, кг/ч; $i_{вл}$ — теплота испарения воды, кДж/кг.

5. Количество тепла, уносимое дымовыми газами из печи, Q_9 (в Вт) определяют из уравнения:

$$Q_9 = V_{д.г} c_{д.г} t_{д.г}$$

где $V_{д.г}$ — объем дымовых газов, покидающих печь, м³/ч; $c_{д.г}$ — теплоемкость дымовых газов, кДж/(м³·°С); $t_{д.г}$ — температура дымовых газов, °С.

6. Количество тепла, теряемое через кладку печи, Q_{10} может быть принято в количестве 10% от общего расхода тепла.

Уравнение теплового баланса имеет следующий вид:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{10}$$

Расход природного газа (в м³/ч) определяют из уравнения:

$$B = \frac{1{,}1\,(Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9) - (Q_2 + Q_4)}{Q_н^р - c_г t_г}$$

ПЕЧИ ПРОИЗВОДСТВА МИНЕРАЛЬНЫХ СОЛЕЙ

Общие сведения

Производство минеральных солей занимает значительное место в химической промышленности. При получении их применяют самые разнообразные печи-термореакторы, которые существенно отличаются друг от друга. По конструкции печи производства минеральных солей можно разделить на следующие типы: 1) вращающиеся; 2) тамбурные; 3) шахтные; 4) камерные; 5) ретортные; 6) карусельные; 7) вихревые; 8) туннельные и другие.

В этой книге рассмотрим только некоторые из них.

Печи цианамидные

Эти печи предназначены для промышленного получения цианамида кальция азотированием тонкомолотого карбида кальция газообразным азотом при высокой температуре

$$CaC_2 + N_2 \longrightarrow CaCN_2 + C + 301 \text{ кДж}$$

Процесс производства цианамида кальция состоит из следующих стадий:

1) подготовка шихты;
2) азотирование шихты в электрических печах;
3) охлаждение, дробление и размол готового продукта;
4) обработка размолотого цианамида кальция минеральным маслом и водой.

Азотирование шихты в электрических печах — основная операция производства. Технический карбид кальция с азотом реагирует только при температурах выше 1000 °С. Скорость реакции азотирования повышается с добавлением 10% $CaCl_2$ или 2—3% CaF_2.

Печь с непосредственной загрузкой шихты. Для получения цианамида кальция применяют печи различных типов: печь с непосредственной загрузкой, туннельные печи типа «Лонца» и вращающиеся печи для непрерывного азотирования карбида кальция.

На рис. 22 показан общий вид цианамидной печи с непосредственной загрузкой шихты. Печь представляет собой цилиндр *1* из листовой стали толщиной 3—4 мм, футерованный изнутри фасонным шамотным кирпичом. Шахта печи снизу несколько сужается на конус, что облегчает выгрузку цианамидного блока из печи. Высота печи около 3 м, верхний диаметр 0,8 м, нижний 0,76 м, толщина футеровки около 90 мм. Для теплоизоляции пространство между стальным кожухом печи и футеровкой засыпают шамотным порошком. Перед засыпкой шихты в печь опускают четыре стальные трубы, которые извлекают по окончании загрузки печи, при этом в шахте образуются каналы *8*. В центральный канал вводят нагревательный электрод *7*, через остальные три, расположенные вокруг центрального, в печь подают азот.

Верхняя часть электрода, вставляемого в центральный канал, представляет собой железную трубу диаметром 15 мм, соединенную

с угольным стержнем. Стержень является нижней частью электрода и опирается на контактную плиту. К электроду подводится электрический ток (напряжение 50—60 В, сила тока 150—170 А) для разогревания шихты.

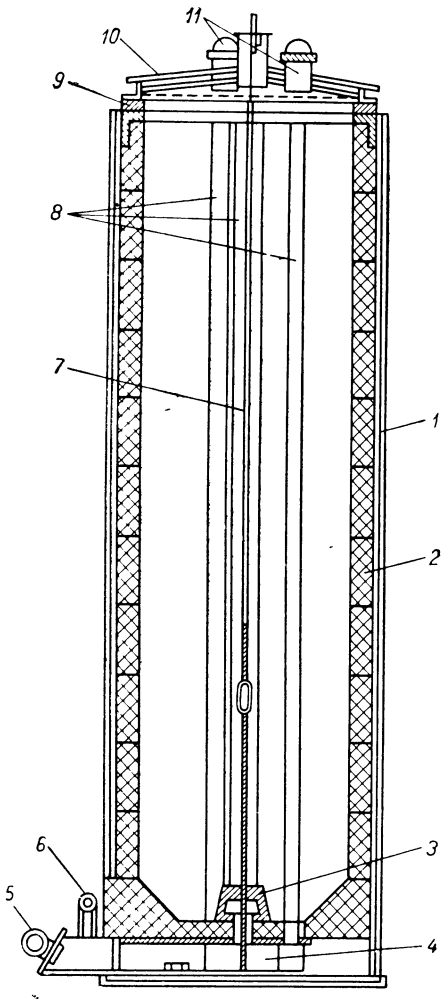


Рис. 22. Печь цианамидная с непосредственной загрузкой шихты:

1 — кожух-цилиндр; *2* — футеровка; *3* — чугунный корпус, *4* — зольная коробка с контактной плитой, *5* — люк; *6* — трубопровод для подачи азота, *7* — электрод; *8* — каналы; *9* — затвор песочный; *10* — крышка; *11* — штуцеры.

Печь заполняют шихтой в течение 10—12 мин, затем ее закрывают крышкой *10* и в течение 8—10 мин продувают азотом для вытеснения воздуха. После этого включают электрический ток.

Азот же подают в печь непрерывно под небольшим избыточным давлением 50—100 Па.

В течение 2—3 ч вся масса шихты нагревается до температуры, при которой карбид кальция начинает взаимодействовать с азотом настолько энергично, что выделяющегося при азотировании тепла становится вполне достаточно для дальнейшего протекания процесса. После этого выключают ток, из печи удаляют электрод, закрывают центральный канал глухой крышкой и повышают давление азота в печи до 2000 Па.

Через 4 ч глухую крышку заменяют крышкой с отверстием диаметра 10 мм, через которое до конца процесса азотирования удаляются из печи отходящие газы (ацетилен, азот и др.). Когда температура в печи снизится до 600—700 °С, подачу азота прекращают. Общая продолжительность цикла азотирования составляет 48—50 ч.

Образовавшийся блок цианамида кальция остывает в печи в течение 1—2 ч, затем при помощи железной штанги и мостового крана его переносят в стальной охладительный стакан на 24—40 ч (в зависимости от времени года).

Помимо печей периодического действия иногда применяют тунельные или вращающиеся печи непрерывного действия. На рис. 23 изображена вращающаяся печь для непрерывного азотирования

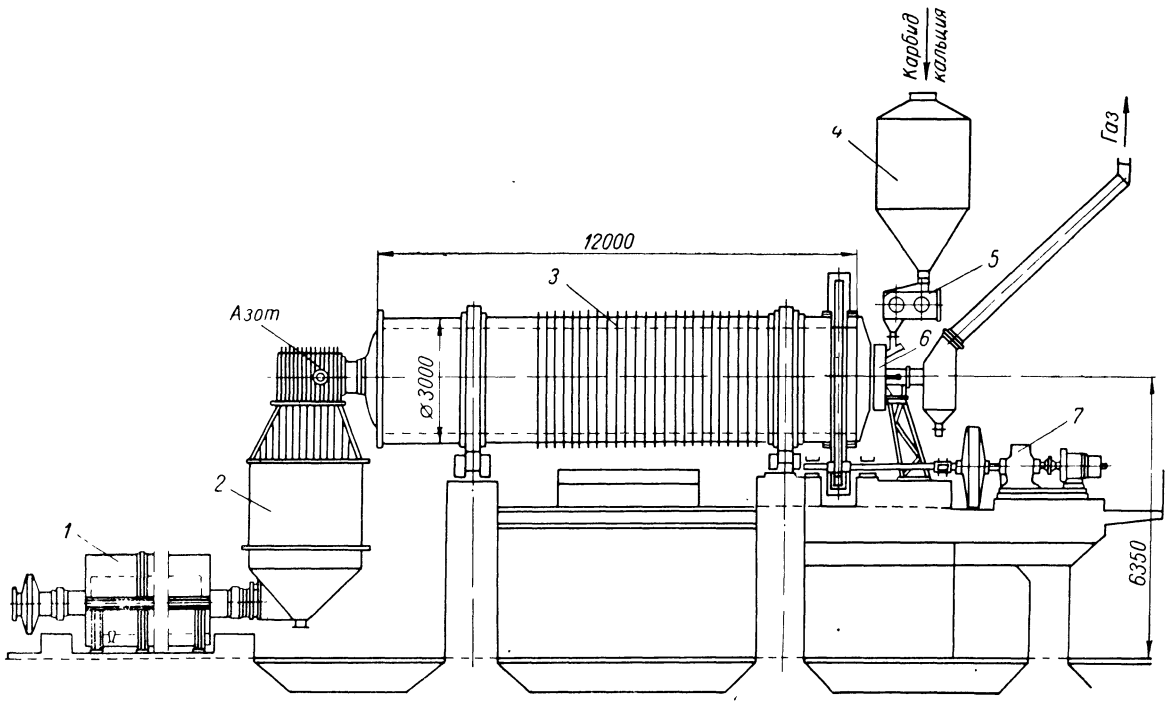


Рис. 23. Печь вращающаяся с барабаном для непрерывного азотирования карбида кальция:
1 — охлаждающий барабан; *2* — бункер для приема продукта; *3* — барабан; *4* — бункер для карбида кальция; *5* — дозатор; *6* — уплотнительное кольцо; *7* — приводной механизм.

карбида кальция, представляющая собой стальной цилиндр длиной 12 м и диаметром 3 м, футерованный огнеупорным кирпичом. Печь вращается со скоростью 26 об/мин. Азот низкого давления вводится в печь около выходного отверстия, азот высокого давления подается по двум трубам, расположенным параллельно оси печи. В такие печи загружают карбид кальция в виде зерен размером 0,3—2 мм с содержанием 2,5% $CaCl_2$. Максимальная температура в печи достигает 1050 °С.

Чтобы предотвратить спекание карбида кальция на стенах печи, в реакционное пространство под давлением 294 кПа вдувается азот через сопла, направленные на стенки. Выходящий из печи цианамид кальция имеет температуру 900—1000 °С. Готовый продукт содержит 22—24% азота.

Эти печи не получили широкого применения, так как карбид кальция должен отвечать более высоким требованиям к гранулометрическому составу.

Печь шахтная для получения плава сульфида натрия

Общие сведения. В промышленности сульфид натрия в основном получают восстановлением сульфата натрия при 1250 °С. При плавке его протекают следующие основные реакции:

$$Na_2SO_4 + 2C \longrightarrow Na_2S + 2CO_2$$
$$2Na_2S + CO_2 + 2O_2 \longrightarrow Na_2S_2O_3 + Na_2CO_3$$
$$Na_2SO_4 + 2C + H_2O \longrightarrow Na_2CO_3 + H_2S + CO_2$$
$$S + O_2 \longrightarrow SO_2$$
$$2H_2 + C \longrightarrow CH_4$$
$$C + {}^1/_2O_2 \longrightarrow CO$$
$$H_2S + 1{}^1/_2O_2 \longrightarrow H_2O + SO_2$$

Состав плава, получающегося в шахтной печи, может быть следующим (в %):

Na_2S	65
Na_2SO_4	5
Na_2CO_3	8
Прочие соли	22

Восстановление сульфата натрия можно проводить с переводом или без перевода шихты в расплавленное состояние. Процесс проводится при 800 °С, в качестве восстановителей берут газообразные вещества. Применение в качестве восстановителя окиси углерода или водяного газа значительно замедляет восстановление, несмотря на наличие катализаторов. Восстановление можно вести в подовых (отражательных), вращающихся и шахтных печах. Плавка в отражательных и вращающихся печах связана с существенными недостатками:

1) периодичность процесса;

2) высокая температура отходящих газов, вследствие чего повышается расход топлива;

3) применение ручного труда и вредные условия работы обслуживающего персонала.

В шахтных печах устойчивее футеровка; они проще по конструкции и имеют большую интенсивность рабочего пространства. В них теплообмен осуществлен по принципу противотока; холодная шихта опускается вниз, постепенно нагреваясь, горячие газы между кусками шихты движутся вверх, охлаждаясь. Это увеличивает использование тепла дымовых газов на нагревание шихты и эндотермические процессы, идущие в печи. Здесь происходит непрерывный процесс, и это облегчает управление им с технологической стороны и создает ряд удобств в выполнении производственных операций. Процесс легко регулируется по производительности в широких пределах изменением количества подаваемого воздуха для горения топлива и реакций окисления. Основные преимущества этих печей следующие:

1) непрерывность процесса;

2) более полное использование топлива и восстановителя;

3) совмещение топлива и восстановителя в одном материале и отопления и восстановления в одном процессе;

4) непрерывный выход плава из горна самотеком;

5) отсутствие ручного труда для перегребания шихты и выгрузки плава;

6) высокая интенсивность процесса.

Наряду с этим плавка в шахтной печи имеет и некоторые особенности.

Непременное условие — хорошая газопроницаемость шихты, загружаемой в печь. Поэтому материал шихты должен быть в кусках с ограниченным количеством мелочи и пыли величиной кусков не менее 10—15 мм (не более 15—20%) или брикетирован.

Шахтная печь работает под оазрежением, поэтому вся шахта печи от фурменного пояса до кол шника и загрузочного устройства тщательно герметизирована. На λ слоем шихты поддерживается разрежение 6—8 кПа. В фурменном поясе и в горне имеются отверстия, сообщающие внутреннее пространство печи с наружным воздухом. Благодаря тому, что шахта печи находится под разрежением, через фурменные отверстия и летки для выпуска плава в печь из помещения цеха непрерывно засасывается воздух, необходимый для горения кокса.

В атмосфере воздуха, поступающего в горн, сгорает кокс, и поэтому в горне поддерживается высокая температура, достаточная для выпуска плава в жидкотекущем состоянии самотеком.

Печь (рис. 24) представляет собой цилиндрическую шахту общей высотой 6040 мм. Нижняя часть ее — горн, который представляет собой самостоятельную конструкцию, выполненную из стали в виде цилиндра с днищем, футерованным хромомагнезитовым кирпичом. Диаметр кожуха горна 1740 мм, высота 740 мм, футеровка стенок вып олнена в один кирпич; внутренние размеры горна: диаметр

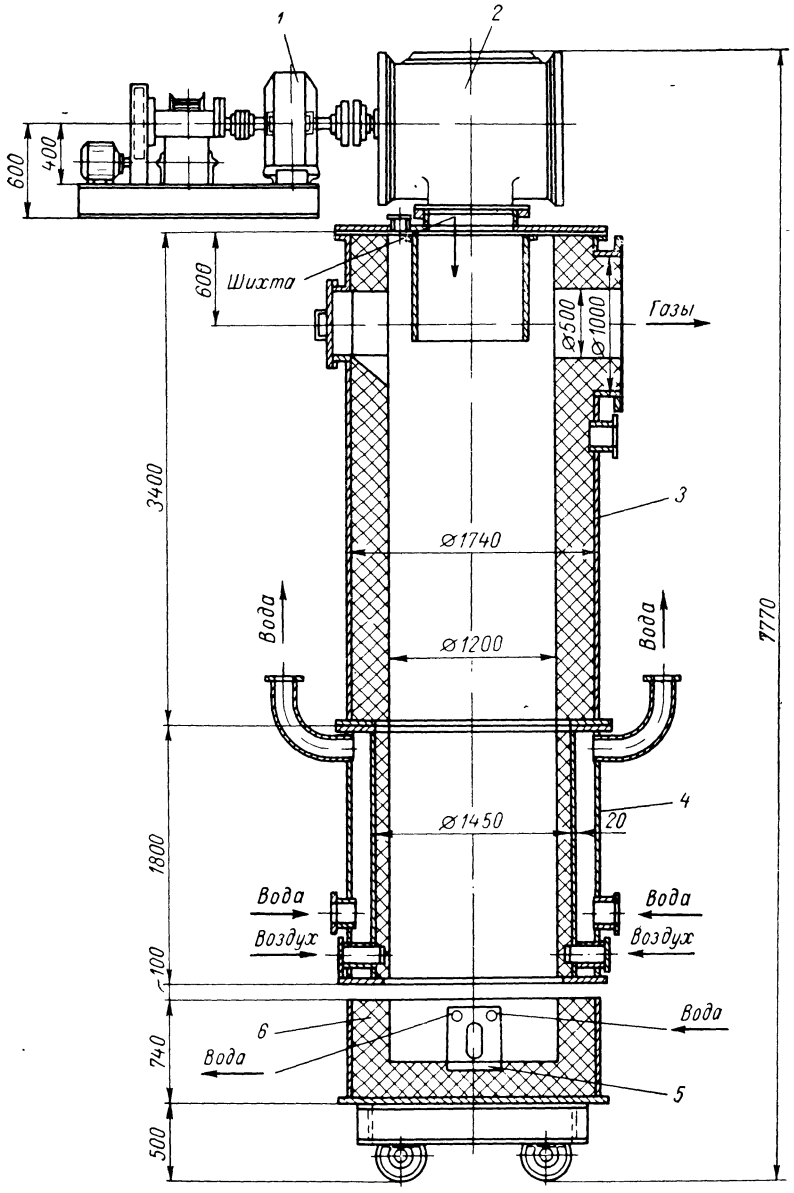


Рис. 24. Печь шахтная для получения сульфида натрия:

1 — механизм для вращения питателя; *2* — питатель; *3* — кожух; *4* — рубашка охлаждения; *5* — летка; *6* — горн.

1200 мм, глубина 450 мм. В боковых стенах горна имеются три окна (летки) для выпуска плава шириной 100 мм, высотой 150 мм; эти окна равномерно распределены по окружности под углом 120°. Низ леток находится на уровне лещади горна. Под летками к кожуху горна приварены водоохлаждаемые стальные желоба, футерованные хромомагнезитовым кирпичом.

Горн смонтирован на раме с двумя вагонеточными скатами и может откатываться из-под шахты печи в сторону. Шахта печи по всей длине имеет цилиндрическую форму с наружным диаметром 1740 мм и внутренним 1200 мм. Шахта с помощью приварных кронштейнов подвешена к двутавровым балкам, укрепленным на железобетонных колоннах, поэтому она не опирается на горн и не связана с ним.

Между нижней частью шихты и верхом горна оставлен зазор 100 мм, который представляет собой фурменную щель, обеспечивающую доступ воздуха из помещения цеха в плавильную зону печи. Нижняя часть шихты выполнена в виде ватер-жакета или кессона— водяной рубашки, сваренной из стали. Кессон имеет цилиндрическую форму (внутренний диаметр 1450 мм и высота 1800 мм) и болтами подтянут к стальному кожуху некессонированной шахты. Площадь сечения печи в поясе фурм равна 1,13 м^2. Некессонированная шахта представляет собой сварной стальной кожух с фланцами наверху и внизу. На верхний фланец сболчена стальная крышка толщиной 30 мм. Для уплотнения между фланцами и крышкой закладывается пропитанный жидким стеклом асбестовый шнур. Под крышкой имеется газоход диаметром 500 мм.

Шахта печи футерована огнеупорным кирпичом на всю высоту. Кессонированная часть футерована хромомагнезитовым кирпичом (в полкирпича), выше кессона — шамотом класса «А» (в один кирпич).

В центре крышки приварен стальной мундштук, который предназначен:

1) для придания центрального направления потоку шихты, высыпающейся из питателя, и тем самым уменьшения неравномерности распределения ее по сечению печи, до некоторой степени предотвращая сегрегацию шихты по крупности кусков;

2) для возможности осаждения более крупных зерен шихтовой мелочи, вынесенной газами из слоя шихты.

С течением времени газоход горячего газа заполняется пылью кокса и сульфата натрия, что приводит к уменьшению разрежения на колошнике и сокращению проплава. Для восстановления нормальной работы печи газоход очищают через люк, устроенный против газохода.

Необходимо регулярно следить за герметичностью всей системы, находящейся под разрежением, и устранять обнаруженные неплотности. При хорошем наблюдении за системой подсос воздуха составляет 4—5% от объема газа, при нормальном ходе плавки использование кислорода воздуха, поступающего в печь, практически полное и газ в верхнем слое шихты может содержать 0,1—0,2% свободного кислорода. При содержании кислорода в горячем газе выше 1,3% надо в системе искать неплотности и ликвидировать их.

Одним из основных элементов печи является питатель. Хорошие эксплуатационные качества показал питатель, разработанный на Балхашском медеплавильном заводе * (рис. 25).

Внутренняя цилиндрическая поверхность корпуса выполняет функцию золотника и тщательно обрабатывается. В качестве золотника применена полая цилиндрическая отливка из чугуна, тщательно обработанная по наружной поверхности, соприкасающейся с зеркалом золотника. При вращении ковша питателя вокруг продольной оси вместе с ним вращаются и золотник, перекрывая либо верхнее приемное, либо нижнее выгрузочное отверстие корпуса.

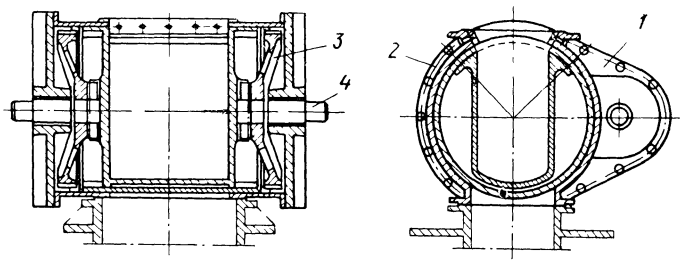


Рис. 25. Питатель:
1 — корпус; *2* — стакан; *3* — колесо; *4* — ось.

Таким образом, золотник все время изолирует внутреннее пространство печи от внешнего. Во время полного оборота ковш-питателя в некоторый момент устьем своим совпадает с верхним приемным отверстием и заполняется материалом из расположенного выше бункера или воронки. При дальнейшем повороте устье питателя совпадает с нижним выгрузочным отверстием корпуса и материал из ковша валится в печь.

Печи с вращающимся барабаном для получения плава хлорида бария

Для производства карбоната бария, гидроокиси бария и сульфата бария (бланфикса) используют хлорид бария. Существуют два метода получения хлорида бария: солянокислотный и Дюфло. При получении $BaCl_2$ по методу Дюфло баритовый концентрат смешивают с углем и загружают в печь. Затем постепенно в печь вводят 50% хлорида кальция. Всю смесь обжигают при высоких температурах (1100—1200 °С) и получают плав хлорида бария. Процесс ведут во вращающихся печах периодического действия.

Основным процессом этого метода является восстановительный обжиг баритового концентрата:

$$BaSO_4 + 2C + CaCl_2 \longrightarrow BaCl_2 + CaS + 2CO_2$$

* Конструкция этой печи разработана инженером П. В. Бурдуковым.

Полученный плав хлорида бария по окончании плавки выгружают в изложницы, установленные на платформах или на разливочном конвейере, дают ему остыть и затем направляют на дробление до кусков размером более 10 мм. После этого плав передают на выщелачивание; последнее производится непрерывно в аппарате с горизонтальной мешалкой горячей водой и промывными водами (шламовых центрифуг), поступающих из напорного бака.

Шлам, оставшийся после отделения хлорида бария, промывают, обезвреживают и сбрасывают. Раствор хлорида бария перерабатывают или на товарный продукт, или используют для получения других солей бария. Плав хлорида бария получают в специальных вращающихся печах периодического действия. Конструкция печи приведена на рис. 26.

Реакционной камерой печи служит барабан, сваренный из листовой стали и футерованной изнутри шамотным кирпичом класса А толщиной 250 мм и теплоизолированный асбестовым листом. Длина барабана 12 м, внутренний диаметр 2,24 м. Барабан установлен горизонтально. Барабан опирается на две опорные станции и приводится во вращение приводным механизмом. Скорость вращения барабана 1,8—2 об/мин. В корпусе барабана имеется три отверстия (люка) для загрузки печи шихтой и разгрузки плава. Во время работы печи люки герметично закрыты. При загрузке печи барабан устанавливается люками вверх, а при разгрузке из печи плава люки установлены вверх, затем их открывают и поворачивают барабан люками вниз и плав сливается.

Топливом для проведения реакции служит природный газ. Горючая газовоздушная смесь приготавливается в горелке. Сжигание топлива осуществляется в горелочном камне и в реакционной камере. Форсунка установлена на откатной тележке под углом 5°. Угол наклона форсунки может изменяться. В верхней части горелочного камня имеется отверстие для распылительной форсунки, в которую подается 56% раствор $CaCl_2$.

К другому концу после переходной камеры барабана примыкает футерованная пыльная камера для улавливания мелких фракций материала из газовой смеси. Мелкие фракции материала из пыльной камеры удаляются при помощи тележки, установленной внизу камеры. Тележка приводится в движение от электродвигателя. Пылевая камера соединяется с вращающимся барабаном переходной камерой, имеющей цилиндрическую форму и футерована огнеупорным кирпичом. Между переходной камерой и барабаном имеется лабиринтное уплотнение. В нижней части камеры имеется люк для выпуска плава, если он из вращающегося барабана перельется непосредственно в переходную камеру. В верхней части переходной камеры устанавливается патрубок для ввода 56% раствора $CaCl_2$.

Дымовые и реакционные газы удаляются из пылевой камеры через боров.

Шихта для получения хлорида бария состоит из баритового концентрата и угля. После загрузки шихты подают непрерывно жидкий

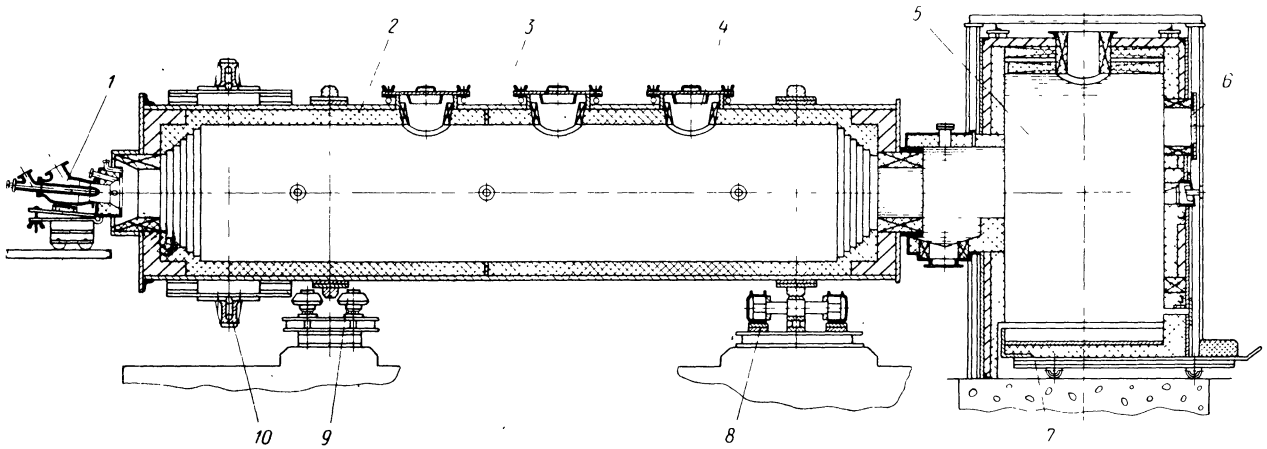


Рис. 26. Печь с вращающимся барабаном для получения плава хлорида бария:

1 — горелка; *2* — футеровка барабана; *3* — барабан; *4* — люк; *5* — осадительная камера; *6* — взрывной клапан; *7* — выкатная тележка; *8* — опорная станция; *9* — опорно-упорная станция; *10* — механизм привода.

56% раствор $CaCl_2$ до тех пор, пока не будет подано требуемое по расчету количество.

Характеристика печи (∅ 2,8 м):

Баритовый концентрат	8,2 т
Уголь Кузбасский СС	2,1 »
Раствор хлорида кальция (56%)	7,1 »
Всего	17,4 т

Режим работы:

Загрузка шихты	25 мин
Загрузка раствора хлорида кальция при работающей печи	60 »
Продолжительность реакции	4 ч
Слив готового плава	35 мин
Всего	6 ч

Расход условного топлива за операцию составляет 2,35 т. Время технологического процесса составляет 5 ч, за операцию получается 11 т плава.

Печь вихревая предназначена для обжига, восстановления и окисления сыпучих материалов и является термореактором общего назначения. Конструкция печи представлена на рис. 27.

Печь состоит из 5 камер: камеры горения, приготовления теплоносителя, смешения сыпучего материала с раскаленными газами, реакционной и осадительной. В камере горения осуществляется горение газовоздушной смеси, предварительно подготовленной в двухпроводной горелке. Сжигание природного газа с коэффициентом избытка воздуха $\alpha \leqslant 1$ дает возможность получить восстановительную газовую среду.

Камера горения имеет цилиндро-коническую форму и выполнена из огнеупорного кирпича. Камера имеет разъемную футерованную торцевую стенку с горелкой. Футеровка камеры горения заключена в сварной металлический кожух с фланцами, при помощи которых крепится к камере приготовления теплоносителя. Камера установлена на катки, что обеспечивает свободное расширение его при нагреве.

Камера приготовления теплоносителя также имеет цилиндро-коническую форму и футерована огнеупорным кирпичом. Футеровка заключена в металлический кожух с фланцами для крепления к камере горения и камере смещения. Вокруг камеры имеется кольцевой коллектор прямоугольного сечения с патрубками, введенными в камеру, для подачи вторичного воздуха или азота на разбавление дымовых газов с целью снижения их температуры и получения необходимой среды. Камера установлена также на катках.

Камера смешения имеет цилиндрическую форму и выполнена из жароупорного бетона, заключена в металлический кожух с фланцем для крепления камеры приготовления теплоносителя и цепного забрасывателя.

Реакционная камера имеет коническую форму, выполнена из жароупорного бетона и теплоизолирована асбестовым листом.

Футеровка заключена в металлический кожух из сварных стальных листов. В верхней части печи реакционная камера заканчивается подпорной диафрагмой. В нижней части реакционной камеры имеется люк для выгрузки осевших крупных частиц материала.

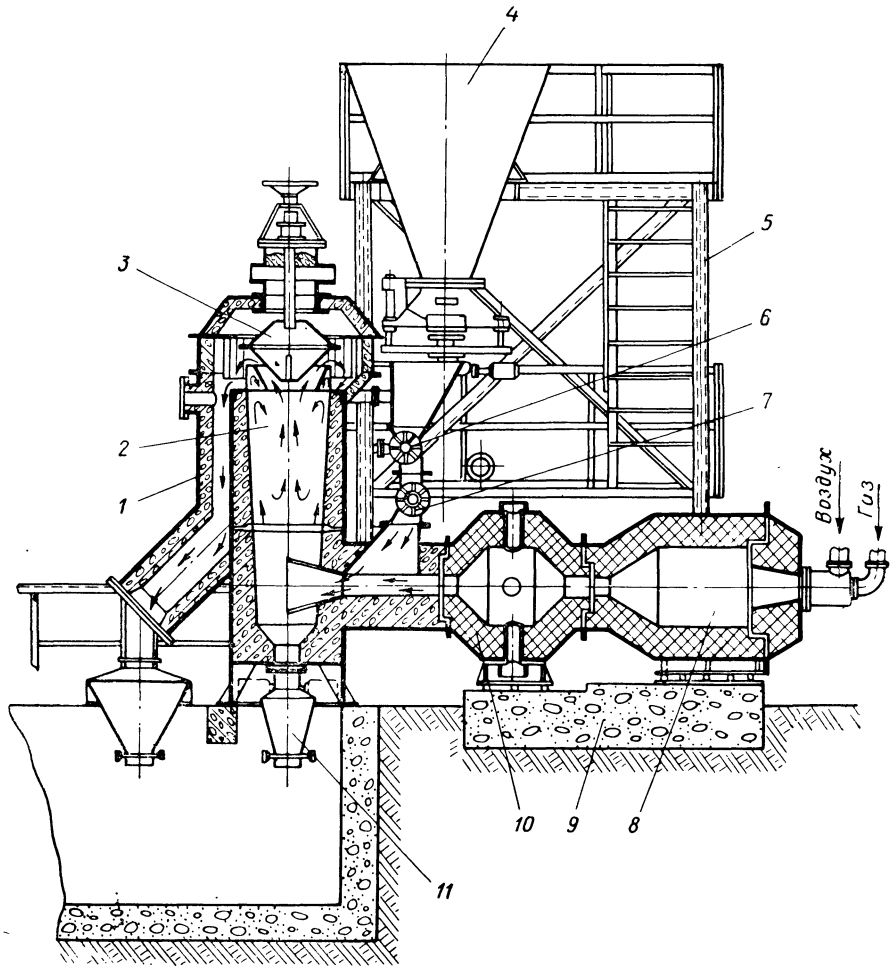


Рис. 27. Печь вихревая:

1 — разгрузочный под; *2* — камера коническая; *3* — направляющая насадка; *4* — бункер; *5* — площадка; *6* — секторный питатель; *7* — цепной забрасыватель; *8* — камера горения; *9* — фундамент; *10* — камера смешения; *11* — люк для выгрузки.

Над реакционной камерой расположена осадительная камера, состоящая из решетки и направляющей насадки, с помощью которой поток газов и материала поворачивается к жалюзийной решетке. Направляющая насадка подвешивается на тягах. Она может опускаться и подниматься, при этом изменяется сечение между диафрагмой и насадкой. За счет изменения сечения щели можно дополни-

тельно регулировать время пребывания материала в реакционном пространстве. Осадительная камера работает как циклон.

Наверху печи установлена раскручивающая улитка для преобразования вихревого движения газа в прямолинейное. В раскручивателе часть энергии вихревого движения газов преобразуется в статический напор, который используется для преодоления сопротивления газоочистных установок, что позволяет уменьшить расход электроэнергии на подачу воздуха в печь. К боковой стенке реакционной камеры примыкает наклонный под для спуска продуктов в приемный бункер.

Для обслуживания механизмов загрузки предусмотрена металлическая площадка. Печь установлена на бетонный фундамент.

Технологический процесс термической обработки сыпучих материалов печи производится следующим образом. Материал из бункера с помощью секторного питателя подается цепному забрасывателю, который направляет материал в поток раскаленных газов. Ввиду больших скоростей газов, достигающих 150 м/с, и сильной турбулизации, материал диспергируется в потоке газов и эта смесь тангенциально вводится в нижнюю зону реакционной камеры, где образуется вихрь газов и твердых частиц материала, который вытесняется в верхнюю зону.

Материал при вихревом движении в реакционной камере в основном располагается по стенкам реактора. Слой материала, подходя к верху реакционной камеры, упирается в подпорную диафрагму. При этом какая-то часть материала с горячими газами выносится из нее в осадительную камеру, остальная масса сепарируется к ее стенкам и уплотненной массой снова сползает в нижнюю зону реактора.

В нижней части реактор сужен, и ввиду повышенных скоростей материал подхватывается газами и снова поднимается в верхнюю зону. Таким образом, совершается многократная циркуляция материала в реакторе независимо от скорости движения газов. Чем меньше будет отверстие в диафрагме, тем больше будет время пребывания материала в печи. С помощью подпорной диафрагмы и конической формы реактора представляется возможным управлять временем пребывания материала в печи до завершения заданного технологического режима.

Материал вместе с газами из реактора поступает в осадительную камеру, где предусмотрена сепарация газов от твердых частиц. В осадительную камеру материал с газами вводится при вихревом движении, поэтому это движение используется для отделения продуктов от газовой фазы.

В осадительной камере отделяется до 90—97% термообработанного продукта. Газы с некоторым количеством продукта мелкой фракции выводятся из печи и очищаются в пылеосадительных аппаратах и выбрасываются в атмосферу.

Вихревые печи имеют следующие преимущества:

1. Созданы условия для длительного пребывания обрабатываемого материала в зоне реактора при активном взаимодействии с потоком газов до полного завершения процесса;

2. При вихревом потоке газов и сырья резко интенсифицируются тепловые и технологические процессы;

3. Созданы возможности переработки сырья с большим содержанием мелких фракций;

4. В потоке газов уменьшается способность спекания частиц материала и его комкования;

5. При высокой интенсификации технологического процесса имеется возможность иметь высокую производительность при малых габаритах.

Печи производства желтого фосфора

Общие сведения. Современная технологическая схема производства желтого фосфора включает в себя следующие операции: а) подготовку сырья; б) приготовление шихты; в) электровозгонку фосфора; г) очистку фосфорсодержащих газов; д) конденсацию фосфора из печных газов.

Печи по технологическому назначению можно разделить на следующие группы:

1) печи подготовки сырья;

2) печи руднотермические для возгонки фосфора.

Печи для подготовки сырья можно разделить в свою очередь на следующие типы: а) печь шахтная для обжига фосфорита; б) печь ретортная для прокаливания антрацита и кокса.

Печь шахтная щелевая двенадцатисекционная предназначена для декарбонизационного обжига кускового фосфорита фракций 10—50 мм перед подачей в руднотермическую печь.

Шахтная печь рис. 28 представляет собой блок двенадцати щелевых рабочих камер (шахт, секций), в которых спускающийся сверху вниз фосфорит проходит последовательно сушку в зоне сушки при средней температуре 550° С, обжиг в зоне прокалки, при 1000—1050° С «дозревание» в зоне выдержки, после чего следует охлаждение материала до 130 °С в зоне охлаждения.

Печь имеет две отдельно стоящие топки, расположенные на разных высотах с двух боковых сторон. Такое расположение топок позволяет иметь во всех рабочих камерах одинаковую температуру на разных высотах, увеличивая регулируемую высокотемпературную зону. Топки оборудованы газовыми трехпроводными горелками для сжигания природного и печного газа, системой контроля за горением ЗЗУ (зонально-защитное устройство). В топку, являющуюся одновременно камерой приготовления теплоносителя нужной температуры, раздельно подается первичный воздух на горение газа и вторичный воздух на разбавление дымовых газов до нужной температуры. Полученный газообразный теплоноситель по борову переменного сечения распределяется вдоль блока щелевых камер и далее по газораспределительному каналу в керне размером 464 × × 840 мм, расположенным по обеим сторонам рабочей камеры, подводится к одному из поясов окон подачи теплоносителя в щелевые камеры. Окна имеют размер 70 × 116 мм. Число их по одной стороне 54 с шагом 232. Окна располагаются в 6 рядов, образуя 2 пояса

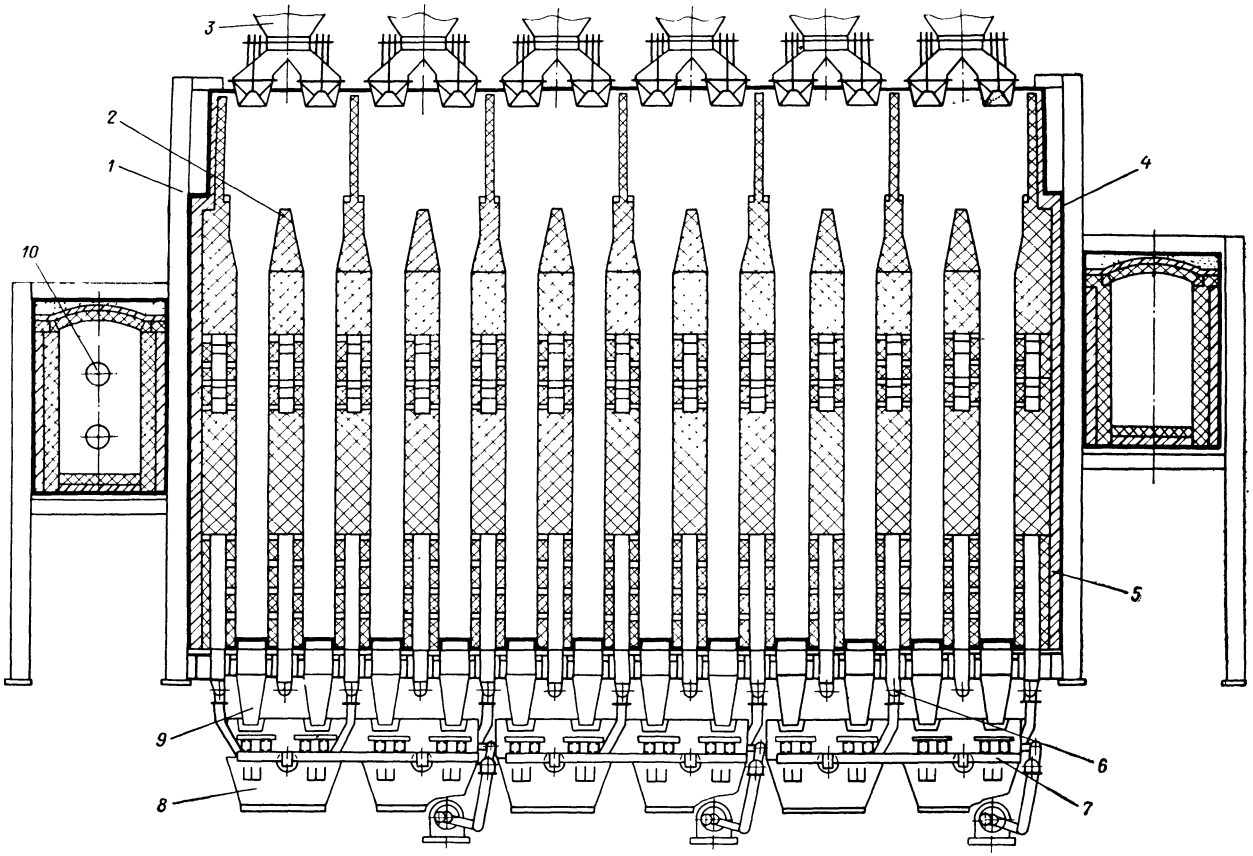


Рис. 28. Печь шахтная щелевая двенадцатисекционная:

1 — каркас; *2* — керн; *3* — механизм загрузки; *4* — кожух; *5* — футеровка; *6* — разгрузочный шнек; *7* —разгрузочная тележка; *8* — течка; *9* — водоохлаждаемая течка; *10* — горелка.

высотой 1,89 м. Наличие 6 рядов окон в газораспределительной стенке печи, а также рассредоточение окон по длине стенок позволяет равномерно распределить теплоноситель по сечению камеры.

Щелевые камеры имеют в плане прямоугольную форму с размерами 0,812 × 3,248 м и высоту 10,735 м. Расстояние между верхом печи и осью верхнего пояса составляет ~6,26 м. Верхняя основная часть щелевой рабочей камеры, где происходит сушка, подогрев и обжиг фосфорита, имеет высоту 5,39 м и работает по принципу противотока. Нижняя часть щелевой камеры размером 2,79 м предназначена для охлаждения кускового фосфорита воздухом по принципу однократного поперечного тока. Между этими зонами находится промежуточная зона выдержки, играющая роль запорной зоны. В этой зоне за счет аккумулированного тепла заканчивается декарбонизация фосфорита.

Объем зоны одной щели сушки и подогрева — 9,0 м^3, зоны обжига — 4,3 м^3, зоны выдержки — 8,5 м^3, зоны охлаждения — 7,3 м^3. Общий полезный объем одной щелевой камеры составляет 29,1 м^3.

Дымовые газы отводятся из каждых двух щелей через короб и два патрубка, выходящие на обе стороны печи.

Короб расположен ниже уровня слоя шихты, для того чтобы дымовые газы отводились непосредственно из слоя фосфорита. В нижнюю часть каждой рабочей камеры поступает воздух от аспирационных установок для охлаждения фосфорита. Воздух поступает в шесть каналов и просасывается дымососом из семи каналов.

Пыль, удаляемая с охлаждающим воздухом из рабочих камер, в распределительном канале осаждается и выводится из печи шнеком. Для придания механической прочности распределительной стенке в зоне охлаждения в нее устанавливается специальная металлическая рамная конструкция.

Фосфорит из зоны охлаждения поступает в водоохлаждаемые течки, где происходит его дальнейшее охлаждение. Дымовые газы, а также воздух из зоны охлаждения поступает на очистку.

Печь футеруется внутри доменным шамотным кирпичом, шамотным кирпичом класса А и теплоизолирована. Борова и топку футеруют шамотным кирпичом класса А с изоляцией. Футеровка верха керна защищена металлической надставкой.

Печь работает под разрежением в надслоевом пространстве 5000—6000 Па, в окнах подачи теплоносителя 50—90 Па, в топке 50—80 Па.

Выполнение футеровки из-за работы ее под разрежением требует особой тщательности. Футеровка заключена в металлический кожух с каркасом с учетом сейсмичности до 10 баллов.

Печь имеет механизмы загрузки и выгрузки. Рассмотренная конструкция шахтной щелевой печи позволяет работать также на режиме сушки фосфорита. В этом случае газовые горелки топки нижнего пояса выключаются и нижний пояс является зоной охлаждения.

Производительность печи в режиме сушки 85 т/ч, температура фосфорита на выходе из печи составляет 90 °С. Нижняя зона печи, т. е. зона охлаждения, не работает.

Печь ретортная для прокалки антрацита. О б щ и е с в е д е н и я. Термоантрацит является одной из составных частей электродной массы самоспекающихся электродов руднотермических печей для возгонки желтого фосфора.

Самоспекающийся электрод представляет собой цилиндрической формы металлический кожух, который заполняется электродной массой. По мере сгорания электрод опускается. Масса, заключенная в кожухе, постепенно нагревается и, пройдя электродержатель (специальные контактные плиты), через которые подводятся электрический ток, коксуется. Полученный электрод по своим качествам не ниже спрессованных и обожженных электродов.

Термоантрацит получают в специальной ретортной печи прокаливанием антрацита при 1200—1300 °С. Под прокаливанием имеется в виду термическая обработка антрацита без доступа воздуха.

Прокаливание — одно из основных и решающих звеньев производственного цикла в технологии электродных материалов, так как существенно влияет на формирование качественных показателей и эксплуатационные свойства готовой продукции. При прокаливании происходит усадка материалов, дегазация, увеличение истинной удельной массы, снижение удельного электросопротивления и реакционной способности и, что особенно важно, повышение термической стойкости.

Абсолютная величина усадки антрацита зависит от его природы, состава и микроструктуры, однако наибольшее влияние оказывает содержание летучих веществ. Для антрацита, содержащего 4,1% летучих веществ, объемная усадка составляет 14,4%, а при содержании летучих веществ 7,3% усадка возрастает до 19%.

Антрацит при прокаливании в плоскости наслоения претерпевает меньшую усадку, чем в направлении, перпендикулярном этой плоскости. В плоскости наслоения уже при 1200 °С усадка прекращается, а в плоскости, перпендикулярной плоскости наслоения, усадка продолжается вплоть до 1500 °С.

Выделение летучих веществ из антрацита начинается с 200 °С и непрерывно плавно нарастает с повышением температуры прокаливания. Максимальная величина газовыделения достигается для донецких антрацитов 700—800 °С, а при дальнейшем повышении температуры резко снижается и при 1200—1400 °С в основном завершается.

Для получения качественного термоантрацита к антрациту предъявляются следующие требования:

	Норма	Метод испытания по ГОСТу
Зольность (A), %, не более	5	6835—52
Содержание серы (S^6), %, не более . . .	2,5	8606—57
Выход летучих веществ (V^r), г/см³, не более	100	7303—57
Механическая прочность на истираемость, %, не более	51	7714—55
Термическая стойкость, %, не более . .	80,0	7714—55

Полученный после прокаливания термоантрацит должен удовлетворять, согласно ГОСТу 4794—49, следующим требованиям:

Зола, %, не более	5
Сера, %, не более	1,9
Выход летучих веществ, % не более	0,3
Механическая прочность при испытании в микуум-барабане, %, не выше	53
Удельное электросопротивление (при удельном давлении), Па	$39{,}2 \cdot 10^4$
Фракции 0,4—0,3 мм, Ом · мм²/м, не более	1000

При прохождении антрацита через печь изменяется его гранулометрический состав (в %) вследствие истирания и усадки материала. В печь загружается антрацит размером 0—17 мм. Процесс термообработки антрацита в ретортной печи может быть разделен на следующие температурные интервалы:

а) предварительное нагревание загруженного в печь антрацита до 105 °С и выделение свободной влаги;

б) нагревание до 300 °С, при котором происходит отгонка адсорбированной влаги;

в) нагревание от 300 до 1350 °С; в этом интервале происходит усадка термоантрацита, дегазация, разложение углеводородов и соединений серы, интенсивное выделение газов;

г) охлаждение термоантрацита.

Конструкция ретортной печи. Для прокалки антрацита в производстве фосфора применяются прямоточные ретортные печи, в которых антрацит нагревается косвенным образом, — теплом, передаваемым через стенку из огнеупорного материала, т. е. нет непосредственного контакта горячих газов с антрацитом.

Ретортная печь (рис. 29) состоит из четырех реторт, расположенных по две в два ряда и имеющих овальную форму с размерами 1740 × 360 мм, толщина стенок равна 80 мм. Высота реторты 6020 мм. В верхней части каждой реторты имеются четыре окна для вывода летучих веществ, получающихся при прокалке антрацита. Летучие вещества через соединительный канал поступают в сборный канал, расположенный также на верху печи. Сборный канал имеет отверстие для чистки, закрываемое специальной крышкой, которая одновременно является взрывным клапаном. Для обеспечения герметичности печи отверстие обрамляется корытообразной чашей с водой, в которую устанавливается крышка. В сборный канал с задней стороны печи подведена металлическая труба для подачи природного газа, с добавлением которого повышается теплотворная способность летучих веществ при горении, что необходимо для поддержания в огневых каналах необходимой температуры.

Сжигание летучих веществ или смеси летучих веществ и природного газа производится в горелке, расположенной на фронте печи. Горелка выполнена из огнеупорного материала. Смеситель топливного газа и воздуха для горения выполнен из высокоглиноземистого шамота; его собирают из двух фасонных блоков. Разделительная стенка выполнена также из высокоглиноземистого шамота. Подвод

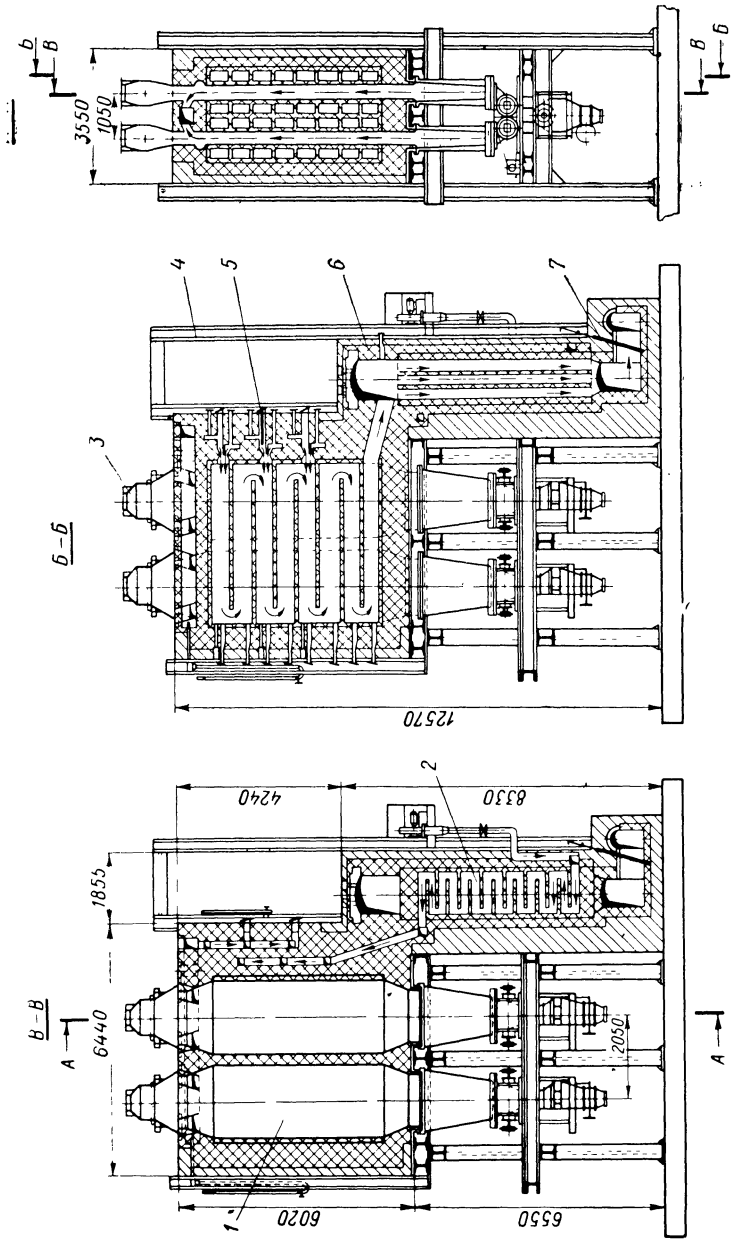


Рис. 29. Печь ретортная:

1 — реторта; *2* — рекуператор; *3* — механизм загрузки; *4* — каркас; *5* — горелка; *6* — футеровка; *7* — шибер.

топливного газа и воздуха к горелке производится через каналы в кладке фронтовой стенки печи. Регулирование подаваемого топливного газа и воздуха из рекуператоров осуществляется керамическими шиберами, установленными на каналах. Горелка позволяет создавать длинный факел на всю длину огневого канала, что очень важно для равномерного нагрева реторт. Каждая реторта обогревается с двух сторон горячими газами, протекающими последовательно по восьми горизонтальным огневым каналам, составляющим один вертикальный канал, а их в печи четыре.

В трех верхних горизонтальных огневых каналах (1, 3, 5) установлено по четыре горелки в одном ряду. Эти каналы можно назвать топочными пространствами. Горячие газы движутся сверху вниз, антрацит поступает сверху и проходит по реторте, поэтому печь и называется прямоточной.

Дымовые газы из восьмого горизонтального огневого канала поступают в общий для каждой секции сборник, затем проходят керамический рекуператор и охлажденные поступают в нижний газосборник секции. Всего секций две. Каждая секция обслуживает по два вертикальных огневых канала печи и соответственно две секции рекуператора, работающих самостоятельно. Из нижних секций дымовые газы по двум соединительным боровам, снабженным наклонными шиберами, уходят в общий боров. В связи с тем, что имеется переток воздуха из воздушного тракта рекуператора в дымовой (из-за неплотностей разделительных стенок переток в каждом рекуператоре различен), то для создания одинакового гидравлического режима перед рекуператором устанавливаются два регулировочных наклонных металлических шибера. Регулировка гидравлического режима шиберами производится вручную.

Переток воздуха из воздушного тракта в дымовой достигает 30% и выше, что значительно ухудшает гидравлические характеристики печи.

Регулировка гидравлического режима для обоих секций рекуператора проводится одновременно и дистанционно с пульта управления поворотной заслонкой, имеющей механизм вращения и установленной на общем борове.

Подогретый воздух, прошедший через керамические рекуператоры, подается по каналам, проложенным в стенке печи, одновременно для двух горелок каждого ряда. Таких каналов в печи два.

Дымовые газы далее из общего борова отсасываются дымососом и направляются в металлическую, футерованную, дымовую трубу и выбрасываются в атмосферу.

В кладку верхней части печи заделываются устройства для загрузки реторт. Каждая реторта имеет собственное устройство для загрузки. Горловина загрузочного конуса обрамлена корытообразной чашей, заполненной водой для создания герметичности в узле загрузки. В конусной части горловины предусмотрены два отверстия для осмотра и шуровки антрацита. Отверстия обрамляются корытообразной чашей, наполненной водой, и закрываются крышкой.

В нижней части печи установлены охлаждающие устройства — ватержакеты для охлаждения термоантрацита до 100 °С. При нормальной работе ватержакетов средний расход воды на охлаждение 1 т термоантрацита составляет 2000—2500 л. Ватержакеты устанавливаются на песочный затвор, приваренный к раме. К нижней части ватержакетов монтируются устройства для выгрузки, которые не только выдают определенную дозу термоантрацита, но и герметизируют узел разгрузки печи.

На фронтальной части печи на линии горелок установлены лючки для очистки огневых каналов от сконденсированных смолистых веществ и ввода временных горелок, используемых для сушки вновь построенной или капитально отремонтированной печи.

Горелка для сжигания природного газа применяется только при сушке печи. Конструкция представляет собой разновидность горелки типа «труба в трубе».

Природный газ к горелке подводится при помощи гибкого шланга от газового коллектора. Воздух на горение подается через патрубок из воздушного коллектора, куда он поступает из специального пускового вентилятора.

Регулирование подачи природного газа и воздуха на горение производится краном и задвижкой, установленными на соответствующих трубопроводах. После окончания сушки горелку вынимают из лючков печи и демонтируют.

На задней стороне печи имеются люки для наблюдения за процессами горения топливного газа и установки приборов КИП.

Для придания механической прочности печь стягивается каркасом из профильной стали. Балки каркаса подвижные и стягиваются круглыми связями из проката.

Футеровка печи. Реторты и огневые каналы печи выполняются из фасонных динасовых блоков. Для обеспечения газоплотности в ретортах и огневых каналах блоки имеют паз и гребень. Изготовление огнеупорных изделий из динаса блоками вызвано удобством монтажа, возможностью придания блокам при формовке необходимых конфигураций, уменьшения числа швов, улучшения герметичности реторт и ускорения выполнения футеровочных работ. Шов между блоками реторты должен быть 2 мм. При футеровке печи между ретортной и теплоизоляционной кладкой оставляется температурный шов (40 мм). Этот шов необходим для обеспечения свободного расширения динасовых блоков со швом в первый период разогрева, когда проводится сушка печи при температурах до 1000 °С. Дальнейшее расширение динасовых блоков при температурах до 1300 °С производится за счет уменьшения шва между изделиями и за счет общего расширения теплоизоляционной футеровки.

Самое серьезное внимание при футеровке должно быть уделено обеспечению газоплотности реторт, чтобы нагретый воздух не попадал в реторты. К швам динасовых блоков огневых каналов специальных требований по герметичности не предъявляют, так как дальнейшая теплоизоляционная футеровка полностью обеспечивает газоплотности печи. Материалом для изготовления блоков реторт

и огневых каналов выбран динас, как имеющий высокие огнеупорные свойства, коэффициент теплопроводности, механическую прочность на истирание при высоких температурах футеровки, что исключительно важно для ретортной печи, и сравнительно низкую стоимость (по сравнению с карборундом, который может быть использован для футеровки, 1 т динасовых изделий стоит в 10 раз дешевле). Срок службы футеровки из динасовых блоков 5 лет непрерывной эксплуатации. Отрицательным свойством динаса является малое число теплосмен, равное 1—4, и неравномерный коэффициент расширения при нагревании, на что необходимо обратить особое внимание при сушке печи.

Вертикальные стены и перекрытия огневых каналов выполняются из динасовых блоков только для того, чтобы обеспечить одинаковое расширение их с футеровкой реторт.

В качестве теплоизоляционного материала принят шамот легковес, как материал, сочетающий в себе одновременно наиболее высокие огнеупорные и теплоизоляционные свойства. Наружный теплоизоляционный слой выполняется из красного кирпича, имеющего хорошие теплоизоляционные свойства при высокой механической прочности.

Учитывая малое число теплосмен, теплоизоляционная футеровка имеет бóльшую толщину, чем достигается низкая температура на наружной поверхности печи, а поэтому и малые потери тепла в окружающую среду. Большая толщина теплоизоляционной футеровки способна сохранить тепло и высокую температуру в огневых каналах длительное время при выключении печи при аварийных ситуациях или при производственной необходимости.

Рекуператор выполняется из шамотных фасонных блоков, также имеющих паз и гребень, для обеспечения герметичности разделительных стенок и ликвидации перетока воздуха из воздушного тракта в дымовой.

Шамотные фасонные блоки успешно работают при температурах отходящих дымовых газов от огневых каналов. Срок службы материала рекуператора до 10 лет.

Характеристика работы ретортной печи. Нормальная работа ретортной печи складывается из соблюдения режима загрузки и выгрузки, поддержания заданного теплового и гидравлического режимов.

Режим загрузки и выгрузки. Скорость, как и количество подаваемого материала в печь, зависит от производительности, которую в состоянии обеспечить печь при оптимальном температурном режиме. Антрацит следует загружать в печь небольшими порциями (1—2 кг), причем скорость подачи должна быть постоянной, что очень важно для обеспечения равномерного выделения летучих веществ, которые подводятся к горелкам и сжигаются.

Для нормальной работы горелки необходимо систематическое поступление летучих веществ при постоянном давлении. При нарушении режима загрузки изменяется количество выделяющихся летучих веществ, изменяется давление в реторте, что вызывает нарушение режима горения.

Уровень загрузки антрацита в реторте должен быть не выше окон соединительного канала, дальнейшее повышение уровня антрацита приведет к заполнению соединительных клапанов, уменьшит сечение и увеличит сопротивление для прохождения летучих веществ. Загрузка и выгрузка должны быть такими, чтобы поддерживался постоянный уровень материала в реторте. Необходимо добиваться равномерного схода материала по всему сечению реторты. В противном случае материал будет продвигаться по центру, вследствие чего снижается эффективность работы реторты, так как она не будет активно работать всей обогреваемой поверхностью.

Тепловой режим. Конструкция ретортной печи не позволяет производить контроль теплового режима ее путем непосредственного измерения температуры антрацита в печи. Контроль температуры осуществляют косвенным путем: измерением температуры горячих газов, обогревающих каналы. Температура в конце первого канала должна быть 1300—1350 °С. Температура факела (начало первого канала) достигает 1500 °С, т. е. перепад ее в первом канале достигает 200 °С. Далее снижение температуры идет более медленно. Температура антрацита повышается, достигая 1100—1200 °С на глубине около 3,0 м. Разницу между температурами конца первого канала и максимально достигнутой в антраците следует принимать равной 150 °С. В зону максимальной температуры поступает холодный антрацит, и на уровне первого канала (в котором температура около 1300 °С) антрацит нагрет всего до 250—300 °С. По мере движения антрацита вниз одновременно снижается температура в обогреваемых каналах. Следовательно, теряются возможности для подъема температуры в самом антраците; это является недостатком конструкций прямоточных печей.

При нормальном режиме термообработки температура в антраците достигает 1150—1200 °С.

Температура выгружаемого термоантрацита не должна быть выше 100 °С.

Температура газов, которые поступают в рекуператор, колеблется от 800 до 1000 °С. Столь высокая температура отходящих газов из восьмого огневого канала и потребовала установки керамических рекуператоров.

Температура отходящих газов из рекуператора составляет 500—550 °С.

Температура воздуха, нагретого в рекуператорах и идущего на горение летучих веществ в горелки, достигает 750—800 °С.

Температура воды, выходящей из ватержакетов, не выше 50—55 °С.

Состав отходящих газов перед рекуператором и после него (в объемн.%):

	Перед рекуператором	После рекуператора
CO_2	15,1	12,2
O_2	2,4	8,7
CO	3,2	—

Причем перед рекуператором $\alpha = 1{,}37$, а после $\alpha = 2{,}06$.

Из приведенных данных видно, что в рекуператоре происходит догорание несгоревшей части газа и разбавление воздухом за счет подсосов через неплотности кладки рекуператора.

Сжигание летучих веществ должно производиться таким образом, чтобы ни в одном из верхних каналов не было коптящего или резкого короткого пламени. При нормальном горении в канале наблюдается вытянутое желтое пламя. В продуктах горения, взятых из последнего канала, содержание кислорода не должно превышать 1,5—2,0% (объемн.).

Наличие в продуктах горения окиси углерода указывает на неполноту горения. Догорание газов в рекуператоре может привести к перегреванию и оплавлению насадки рекуператоров, а также к перегреванию боровов. По технологическим требованиям при прокаливании антрацита он должен иметь максимальную температуру, что достигается путем удлинения пламени и увеличения разрежения. В последнем случае печь работает менее экономично, так как отходящие продукты горения имеют очень высокую температуру.

Гидравлический режим. Для успешной эксплуатации печи необходимо выдерживать определенный гидравлический режим. Оригинальность конструкции прокалочной ретортной печи заключается в том, что внутренний объем реторты, в которой производится прокаливание антрацита, связан системой огневых каналов с дымовой трубой. В связи с этим, создавая то или иное разрежение в печи, неминуемо вызываются изменения давлений и разрежений по высоте реторты.

Давление в реторте создается за счет выделения летучих веществ. Чем больше летучих веществ содержится в прокаливаемом антраците, тем выше будет давление в реторте при одном и том же тяговом режиме в печи.

Летучие вещества являются основным видом топлива для ретортной печи. Состав летучих веществ (в объемн.%) при термообработке антрацита следующий:

CO_2	10,3	CH_4	2,95
O_2	0,2	H_2	11,3
CO	11,5		

Температура летучих веществ в сборном канале при нормальном состоянии футеровки печи обычно колеблется от 260 до 300 °С. При нарушении плотности футеровки в печь подсасывается воздух, летучие вещества горят и температура их поднимается до 780—800 °С. Таким образом, по изменению температуры летучих веществ можно судить о состоянии футеровки.

Нормальное разрежение в печи, измеренное перед рекуператором, должно колебаться в пределах 50—80 Па, после рекуператора ~160—200 Па, в боровах ~220—240 Па.

Разрежение в первом огневом канале должно быть ~20—30 Па, а в восьмом ~80—100 Па.

Для предохранения материала от сгорания, а также для создания условий, необходимых для выхода летучих веществ из реторты к горелкам, следует поддерживать определенное давление газов в реторте. Практически это давление, измеренное в верхней части реторты, составляет около 10 Па, однако оно неодинаково по высоте. Давление понижается сверху вниз, и в нижних частях реторты имеется разрежение, которое около разгрузочных устройств достигает 20—30 Па. В результате неплотностей, имеющихся в разгрузочных устройствах, в рабочую зону реторты попадает воздух и окисляет раскаленный антрацит. С возрастанием разрежения и при меньшей степени герметизации выгрузочных устройств угар антрацита увеличивается до 3%.

Производительность реторты зависит от физико-химических свойств сырья и от требований, предъявляемых к термоантрациту, и от конструктивных особенностей печи.

Ниже приведены основные технические показатели работы ретортной печи для термообработки антрацита:

Средняя температура в конце первого канала	1350 °С
Максимальная температура в прокаливаемом антраците	1200 °С
Среднее время пребывания антрацита в печи	24 мин
Среднечасовой съем термоантрацита с реторты	80 кг/ч
Общий угар, включая летучие вещества	5,0%
Угар чистого углерода	1,2%
Удельный расход природного газа на прокаленный антрацит	200 м³/т
Коэффициент полезного действия печи	37—40%

Печи руднотермические для возгонки желтого фосфора. О б щ и е с в е д е н и я. Руднотермическая печь является основным агрегатом для электротермического получения желтого фосфора и относится к печам прямого нагрева. Теплота, необходимая для проведения технологического процесса, выделяется непосредственно в ванне печи при горении дуг и в результате активного сопротивления шихты и шлака прохождению электрического тока, подведенного самоспекающимися электродами. Поэтому руднотермические печи относятся к классу дуговых печей сопротивления.

Специфика технологического процесса получения желтого фосфора обусловливает некоторые ее конструктивные особенности. То обстоятельство, что токсичный желтый фосфор получается в газообразном состоянии, предъявляет особые требования к герметизации ванны печи, которая должна сохраняться, несмотря на то, что через свод проходят электроды и питательные течки.

Руднотермическая печь представляет собой комбинацию в одном агрегате технологического и электрического устройства, поэтому при выборе электрических и геометрических параметров, ее конструкции и работы должны быть созданы все необходимые условия для успешного протекания технологических и электрических процессов.

Классификация электропечей. По конструктивным особенностям руднотермические печи, применяемые в производстве фосфора в настоящее время, можно разделить на следующие типы:

а) печи с круглой стационарной ванной и треугольным расположением электродов;

б) печи с круглой вращающейся ванной и треугольным расположением электродов;

в) печи с треугольной стационарной ванной и треугольным расположением электродов.

Фосфорная промышленность СССР в основном оснащена электропечами РКЗ-48Ф; РКЗ-48Ф-М1; РКЗ-72Ф.

Первая буква показывает метод нагрева — руднотермический; вторая — форму ванны — круглая; третья — герметичность ванны — закрытая. Числовое значение, следующее за буквенным, означает мощность электропечи; буква Ф — индекс фосфорных печей, буква М показывает модернизацию базовой печи и цифра за ней — порядковый номер модернизации.

Печь РКЗ-48Ф-М1. Руднотермическими герметизированными электропечами РКЗ-48Ф-М1 и РКЗ-72-Ф оснащаются современные химические заводы, производящие желтый фосфор электротермическим методом. Так как конструкции этих печей подобны, то рассмотрим только печь РКЗ-48-М1 (рис. 30).

Основными конструктивными элементами печей являются:

а) ванна; б) выходы из печей; в) свод; г) крышка печи; д) устройство для подачи шихты; е) электрод; ж) электрододержатель; з) оборудование электроснабжения; и) водяное охлаждение.

Ванна печи представляет собой химический реактор, в котором протекают многочисленные химические реакции. В нее загружают шихту, находящуюся в различном физико-химическом состоянии (от твердых кусков до расплавленной массы), шлак, феррофосфор и печной газ, содержащий фосфор. Технологические процессы, протекающие в ванне, очень разнообразны. Одни протекают непрерывно, другие требуют полного проплавления загруженных материалов. Важнейшим параметром печи является электрическое сопротивление материалов. Оно зависит от большого числа факторов: удельного сопротивления материалов, находящихся в ванной, геометрических размеров ванны, числа и размеров электродов, их расположения в ванне. Пронизываемая током большой силы, ванна находится в электромагнитном поле с высокой магнитной напряженностью, оказывающим влияние на распределение в ней мощности. Взаимная связь этих факторов с требованием технологии предопределяет электрический режим работы печи.

Ванна руднотермической фосфорной печи имеет 4 зоны, отличающихся как по составу, так и по проходящим в них процессам. В первой зоне протекают сушка и некоторые твердофазные процессы. В этой зоне температура шихты ниже температуры плавления минеральных компонентов. Шихта в этой зоне подогревается за счет тепла отходящих газов. Во второй зоне начинается плавление минеральной части шихты и температура в этой зоне составляет 1300—1400 °С.

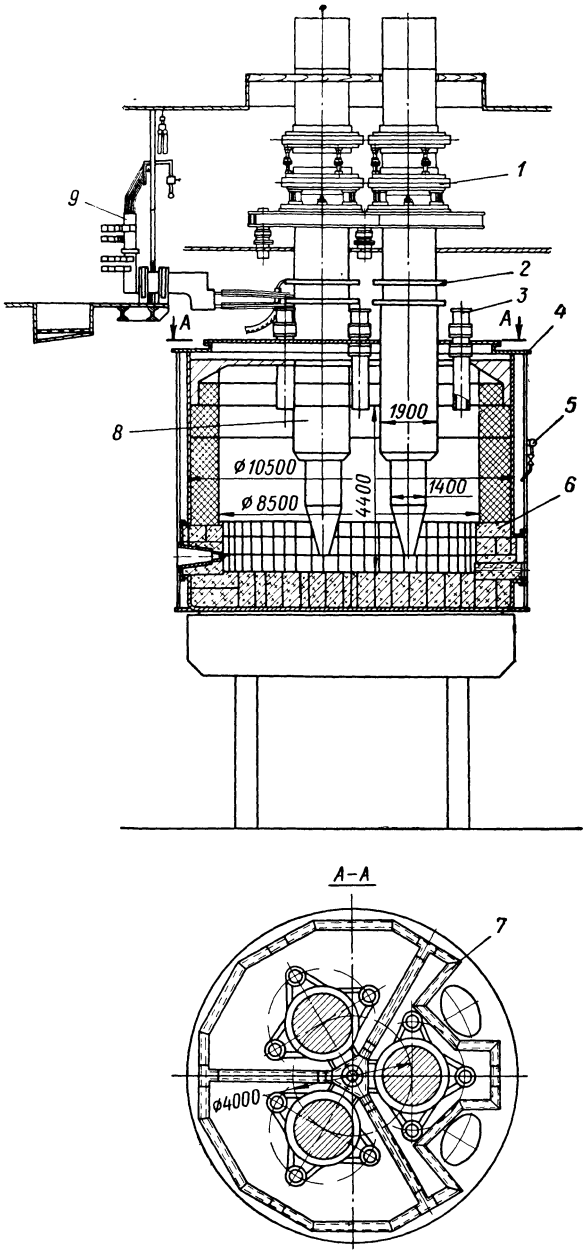


Рис. 30. Печь руднотермическая РКЗ-48Ф-М1:
1 — устройство для перепуска электрода; *2* — электродержатель; *3* — загрузочное устройство; *4* — кожух ванны; *5* — водоохлаждение; *6* — футеровка ванны; *7* — крышка; *8* — электрод; *9* — трансформатор.

Появляющаяся жидкая фаза стекает в нижние горизонты печи, взаимодействуя с твердыми частицами шихты. Поскольку кокс всегда задается с некоторым избытком, рассчитанным на его потерю вследствие сгорания, уноса и вследствие неполноты проходящих реакций, постепенно по мере осаждения шихты и наполнения шлака он всплывает над образовавшимся расплавом и образуется слой. Таким образом, появляется третья зона, которую можно назвать углеродистой или коксовой. Содержание в ней кокса выше, чем в шихте. В этой зоне происходит процесс химического взаимодействия восстановителя с расплавом. Расплав, проходя эту зону, как бы фильтруется через слой кокса. При этом обеспечивается достаточно высокая поверхность контакта фаз и непрерывный отвод продуктов реакции. Пройдя коксовую зону, расплав приобретает тот состав, который необходимо получить. В этой зоне протекает основной технологический процесс восстановления фосфата кальция до элементарного фосфора вследствие того, что до появления жидкой фазы, восстановление фосфатов кальция не происходит. Четвертая зона ванны является зоной расплава шлака и феррофосфора, состав которого практически стабилен. Прохождение реакции в этой зоне незначительно и может проходить только в поверхности контакта расплава и кокса.

В основе электротермического способа производства фосфора лежит реакция восстановления фосфата кальция углеродом в присутствии кремнезема, при проведении процесса в жидкой фазе, реакция может быть записана в следующем виде:

$$Ca_3P_2O_8 + 5C + nSiO_2 \longrightarrow 3CaO \cdot nSiO_2 + P_2 + 5CO$$

где n — определяется требуемым модулем кислотности ($M_к = \frac{SiO_2 + Al_2O_3}{CaO + MgO}$) и не имеет фиксированного числа.

На механизм и кинетику восстановления фосфата кальция существенное влияние оказывает наличие расплава, имеющего высокую температуру, и определенный модуль кислотности.

Полнота восстановления фосфата кальция зависит от поверхности контакта расплава с коксом, времени контакта с восстановителем и физико-химических свойств расплава, а гранулометрия восстановителя, размеры углеродной зоны, положение электрода и другие технологические и электрические параметры оказывают решающее значение на характер зависимости содержания P_2O_5 в шлаке от $M_к$.

Ванна фосфорных печей выполняется круглой формы, так как у них лучший электрический коэффициент полезного действия, для сооружения требуется меньше металлов и огнеупоров. Ванна состоит из металлического кожуха и огнеупорной футеровки.

Металлический кожух ванны предназначен для обеспечения механической прочности и герметичности, так как печь работает под давлением 50—500 Па печного газа, являющимся сильнейшим отравляющим веществом, и выбивание его в атмосферу цеха недопустимо.

Кожух ванны выполняется сварным из стального листа. Боковые стены имеют толщину 25 мм, а днище ванны 32 мм. Кожух имеет круглую форму. Днище ванны плоское с закругленными вверх кромками. К днищу приварены швеллера, соединенные в секции, образующие каналы для протекания охлаждающей воды. На каждой из секции установлена запорная арматура.

Охлаждение днища кожуха необходимо для предотвращения попадания жидкого феррофосфора на металлическое днище кожуха, в случае прорыва феррофосфора через швы и щели в футеровке. При наличии охлаждения расплавленный феррофосфор застывает в холодных горизонтах футеровки не достигнув днища кожуха. В боковой стенке кожуха имеется три отверстия с приваренными рамами и фланцами. В эти отверстия устанавливаются летки для выпуска шлака и феррофосфора.

Для увеличения прочности ванны и наружной стенки кожуха вертикально приварены двутавры. Металлический кожух служит также, как опора для крышки печи.

Для футеровки ванны рудпотермических печей используются углеродистые блоки. Они имеют следующие преимущества: сохраняют прочность при высокой температуре; достигающей в реакционной зоне 2000 °С, химической стойкостью к воздействию агрессивного расплавленного шлака и феррофосфора, обладает сравнительно большой теплопроводностью. Поскольку углеродистые блоки не стойкие к окислительной атмосфере, их применяют для футеровки участков, которые изолированы от окислительных реагентов шихты, а именно, для футеровки подины, боковых стенок ванны. Блоки для футеровки подины имеют толщину 1100 мм, а блоки боковых стенок имеют толщину 925 мм. Высота футеровки боковых стенок углеродистыми блоками равна 1650 мм.

Между углеродистыми блоками подины и металлическим днищем имеется 60 мм выравнивающей прослойки из подовой массы. Кольцевой зазор между углеродистыми блоками подины и боковой стенкой заполняется также подовой массой.

Выше футеровки боковых стенок из углеродистых блоков стенки футерованы шамотными кирпичами нормальных размеров. Кладка имеет толщину 975 мм и высоту 2600 мм. Футеровка шамотными кирпичами служит для теплоизоляции. Загружаемая шихта на этой высоте ванны печи не расплавлена и нет опасности агрессивных воздействий на шамотную футеровку. Шамотная футеровка также выполняет роль опоры бетонного свода печи.

Вывод газообразных продуктов. Для вывода газообразных продуктов реакции фосфорная печь имеет два выхода. Эти выходы встроены в кожух ванны, а в железобетонном своде печи предусмотрены соответствующие отверстия. Выходы не соприкасаются с металлической крышкой и состоят из наклонно встроенных коротких труб. На конце этих труб с помощью фланцев устанавливаются клапаны, которые соединены с электрофильтрами. Выходные отверстия из печей, соединительные трубы, клапаны являются газоходами между фосфорной печью и электрофильтрами. Остаточные газы из печи

выводятся через трубопровод малого сечения непосредственно в атмосферу.

Шлаковая летка. Выпуск жидкого шлака производится через две шлаковые летки, расположенные в боковой стороне печи на высоте 400—450 мм от подины. Угольный блок для удобства монтажа состоит из двух половин. В отверстия углеродистых блоков вставляется шлаковая летка, состоящая из вставленных одна в другую медных конических втулок с двойными стенками (фурма и дюза). С целью охлаждения через фурму и дюзу пропускается охлаждающая вода. Дюза и фурма служат для прохождения жидкого шлака через стенку печи, температура которой достигает 1350—1500 °С. Разделение на дюзу и фурму производят для того, чтобы при износе, главным образом, с внутренней стороны выпускного отверстия можно заменить только дюзу.

Летка для шлака немного выпускается из футеровки печи как во внутрь, так и наружу. Выступающие наружу части леток входят в отверстия (рамки) кожуха печи. К рамкам прикреплены торцевые пластины, к которым крепятся кронштейны для фурмы и дюзы. Торцевые пластины герметично закрывают летку.

Летка для феррофосфора. Выпуск феррофосфора из печи производится через летку, выполненную из углеродистого блока. Этот блок изготовляется длиной 1600 мм и сечением 550 × 500. Отверстие летки диаметром 60 мм высверлено точно по центру этого блока. Летка для феррофосфора выступает из футеровки печи наружу. Она окантована рамкой, приваренной к кожуху ванны печи. Отверстие в летке для феррофосфора расположено точно над подиной ванны. Этим достигается полный слив феррофосфора из печи. Выпуск феррофосфора производится периодически, когда расчетное его количество составит 10 т.

Крышка печи. Для газонепроницаемого закрытия ванны печи над железобетонным сводом устанавливается металлическая крышка из антимагнитной кислотостойкой листовой стали. Крышка состоит из трех сегментов по 120°. По всему периметру сегменты имеют фланцы. Сегменты между собой и с кожухом ванны соединяются привинчиванием фланцев с накладками. Соединение делается газонепроницаемым и с электрической изоляцией. Это достигается использованием изолирующих промежуточных слоев между фланцами и накладками и изолирующих ушков и шайб для болтов.

Крышка из листовой стали не имеет прочного соединения с железобетонным сводом. Пространство между крышкой и сводом заполняется песком. Таким образом, железобетонный свод не испытывает перегрузки.

На крышке печи приварены сальники из нержавеющей стали для крепления уплотнения водоподводящих труб, охлаждающих пространство между электродами. На крышке имеются также необходимые отверстия для провода электрода и течек. Наваренные вокруг этих отверстий фланцевые кольца сделаны из нержавеющей стали. Фланцевые кольца каждого сегмента соединены между собой ребрами, которые образуют одно целое. Фланцевые кольца для те-

чек соединены через эти точки с конструкцией здания. Благодаря этой «подвеске» крышки печи и жесткому соединению фланцевых колец между собой нет большой нагрузки на крышку печи при подъеме и опускании электродов.

Электроды. Электрод является проводником электрической энергии в ванну и поэтому становится важнейшей технологической частью ванны.

Бесперебойная эксплуатация руднотермических электропечей в основном зависит от стабильности работы электродов. В мощных руднотермических фосфорных электропечах применяются самоспекающиеся непрерывные набивные электроды. Стабильность работы электродов зависит от следующих главных факторов:

1) состава «сырой» электродной массы;
2) температурного режима обжига электродной массы в печи;
3) качества кожуха электрода.

Самоспекающийся электрод состоит из металлического кожуха цилиндрической формы и электродной массы. Для формирования электрода набивную электродную массу загружают в расплавленном состоянии в металлический кожух, изготовленный из листовой стали. Стальной кожух собирают из отдельных секций, которые при наращивании электрода сваривают одну с другой.

Стальной кожух служит не только для формирования электрода и его обжига, но и несет нагрузку как электрический проводник. В обечайке кожуха из-за поверхностного эффекта плотность тока выше, чем в ребрах и значительно больше, чем в угольном блоке. Если обжиг не завершился, то весь ток проходит по кожуху.

Электрододержатель предназначен для передачи электроэнергии электроду печи, удерживания и перепуска электрода по мере его расхода и регулирования положения электрода в ванне печи. Электрододержатель состоит из:

а) устройства подачи электроэнергии электродам;
б) механизма перепуска электрода;
в) механизма перемещения электродов.

Устройство подачи электроэнергии электроду представляет собой завершающую часть системы электроснабжения руднотермической печи. Оно состоит из: токоведущего кольца, трубошин, контактных щек и их прижимного механизма, мантеля (защитного кожуха), сальников, обеспечивающих герметичность между электродом и мантелем, а также системы водоохлаждения устройства.

В каждом устройстве установлены 12 прижимных контактных щек, которые все вместе образуют замкнутое кольцо вокруг электрода. Каждая контактная щека имеет 1200 мм в высоту и 400 мм в ширину и выполняется из катаной меди. Для создания надежного контакта между электродом и токоподводящей щекой она должна быть прижата к электроду с достаточным усилием. Каждая контактная щека прижимается к электроду отдельно силой давления прижима равной 0,25 МПа. Этого прижимного усилия достаточно для обеспечения нормального прохождения электрического тока, исключения смятия кожуха электрода и проведения перепуска электрода

без ослабления нажима контактных щек. Надежность контакта щека — электрод зависит также от состояния их поверхности.

Давление прижима контактной щеки обеспечивается за счет предварительно сжатых тарельчатых пружин. Усилие, развиваемое пружинами через систему рычагов, передается в двух точках на контактную щеку; такая система рычагов обеспечивает строгое прижатие к электроду практически всей поверхности щеки и отсюда максимальную электрическую нагрузку на нее.

Для отжима контактных щек от кожуха электрода используется гидравлический цилиндр. Под действием давления масла поршень гидравлического цилиндра отжимает щеки от поверхности электрода примерно на 10 мм.

Внутри контактных щек имеются каналы, по которым протекает охлаждающая вода. К каждой контактной щеке ток подводится по двум токоподводящим трубкам. По тем же трубкам подводится и отводится охлаждающая их вода.

Контактные щеки и токоподводящие узлы должны быть надежно изолированы от механизма прижима щек и мантеля. С целью уменьшения длины токоведущей части электрода, контактные щеки должны находиться под сводом печи.

Масса устройства подачи электроэнергии и часть нагрузки электрода через четыре тяги передается на траверсу, которая связана с механизмом регулирования положения электрода и перепуска его.

Прижимные контактные щеки с относящимися к ним устройством прижима и токоподводящими трубками находятся в мантеле, предохраняющим их от теплового излучения ванны печи. Мантель представляет собой цилиндр с двойными стенками из нержавеющей стали, по которым протекает охлаждающая вода. Последняя защищает мантель от чрезмерного перегрева и тем самым от разрушения или деформации. Охлаждающая вода идет между стенками в двухспиральнообразных каналах, а в нижней части мантеля по двухходовому змеевику, благодаря этому достигаются независимые системы друг от друга. При выходе из строя одной из систем, другая продолжает работать. При опускании или поднятии электрода мантель проходит вместе с электродом через уплотнительный сальник. Поэтому с наружной стороны мантель должен иметь строго цилиндрическую форму.

Для предотвращения попадания в систему печного газа в пространство между материалом и электродом вводится инертный газ.

Механизм перепуска электрода. Израсходованная в процессе получения фосфора нижняя часть самоспекающегося электрода периодически компенсируется за счет приварки к верхнему концу электрода новых секций кожуха с последующим заполнением их электродной массой. После этого электрод с помощью механизма перепуска оп скается вниз. Операции наращивания и перепуска электрода регулируются таким образом, что длина его рабочей части в ванне печи остается примерно постоянной. Этот механизм во время работы должен обеспечивать нормальный перепуск электрода как под собственной тяжестью, так и в случае принудительного пере-

пуска, когда электрод заклинивается в электрододержателе и под действием собственной массы не опускается. Самопроизвольный перепуск электрода (проскальзывание) также исключается. Механизм должен сохранить целостность конструкции кожуха электрода и строгое сохранение его геометрической конфигурации, так как деформированный кожух не обеспечивает надежного контакта с токоподводящими плитами.

Механизм перепуска состоит из верхнего и нижнего колец, охватывающих электрод. Внутри каждого кольца имеются девять щек, обклеенных с внутренней стороны резиной. Прижим щек к электроду осуществляется пружинами. Верхнее и нижнее кольца соединены между собой тремя гидродомкратами. При нормальной работе печи щеки верхнего и нижнего колец прижаты пружинами к кожуху электрода и перемещаются вместе с ним. При перепуске электрода щеки нижнего и верхнего колец поочередно отжимаются. Отжатие пружин осуществляют с помощью гидроцилиндров. Рабочее давление масла в цилиндрах перепуска 0,35—0,2 МПа.

Для перепуска электродов в гидросистему нижнего кольца подается масло и нижнее кольцо отжимается. Далее с помощью вертикальных цилиндров электрод вместе с верхним кольцом опускается вниз на заданную величину. После этого подача масла прекращается, давление в гидросистеме снижается и нижнее кольцо под действием пружин зажимает электрод в новом положении. Затем таким же способом отжимается верхнее кольцо, освобождая кожух электрода, и вертикальными цилиндрами перемещается вверх, в свое первоначальное положение. После прекращения подачи масла в гидросистему верхнего кольца под действием пружин верхнее кольцо зажимается.

Таким образом, кожух электрода оказывается зажатым в верхнем и нижнем кольцах и за один цикл электрод опускается не более чем на 30 мм, а максимально на 100 мм. Гидродомкраты механизма перепуска работают попарно. Два противоположных домкрата составляют отдельную гидравлическую систему и приводятся в действие одним из масляных насосов, расположенных на траверсе. Для осуществления перепуска уменьшается давление масла в гидравлической системе, электрод опускается под действием собственной тяжести и проходит через траверсу и электрододержатель на заданную глубину. Перепуск возможен в пределах рабочего хода поршней гидродомкратов равного 2250 мм с рабочим давлением 6 МПа. При необходимости увеличения длины перепуска и при достижении нижнего предела хода поршней одной парой предварительно следует нарастить новый кожух электрода с опорным кольцом. Когда масса электрода передается на новое опорное кольцо и вторую пару поршней, старое опорное кольцо снимается с электрода, чтобы не мешать производить следующий перепуск. Если электрод заклинивает и под действием собственной тяжести он не опускается, то посредством обратного хода цилиндра гидравлической системы осуществляют принудительный перепуск.

Механизм перемещения электрода. Мощность фосфорной печи (а следовательно, и ее производительность) зависит от величины вторичного напряжения печных трансформаторов и силы тока. Сила тока при выбранной ступени напряжения определяется электрическим сопротивлением реакционной зоны печи. Электрическое сопротивление не является стабильным и меняется в процессе работы в зависимости от состава и качества шихты, поступающей в печь, температуры процесса, уровня шлака в ванне и ряда других технологических параметров. Обратно пропорционально сопротивлению изменяется и сила тока.

Для нормальной работы печи на постоянной мощности и заданной ступени напряжения приходится все время регулировать силу тока, поддерживая ее постоянной. Такая регулировка достигается выравниванием электрического сопротивления реакционной зоны путем изменения пути прохождения электрического тока в ванне печи. Это изменение осуществляется подъемом и опусканием электродов с помощью механизма перемещения, который обеспечивает равномерный и плавный подъем и опускание электрода. Скорость перемещения электрода должна составлять 0,1—0,5 м/мин.

Перемещение электродов должно быть строго по вертикали, чтобы не происходило перекоса электродов и их заклинивания. Механизм перемещения должен исключить самоопускание электрода. Для строго вертикального перемещения электродов требуется точное расположение поршней гидродомкратов, а следовательно, и горизонтальное положение траверсы. Синхронную работу гидродомкратов обеспечивает уравновешивающее устройство, состоящее из двух зубчатых реек и нескольких шестерен, расположенных в механизме передач.

Привод механизма перемещения гидравлический. Рабочее давление в гидросистеме до 4,5 МПа. Управление перемещением электродов производится как вручную, так и автоматически. При автоматическом управлении номинальная сила тока в печи задается заранее и отклонение ее от этого значения дает импульс на масляные насосы, которые, соответственно, увеличивают или уменьшают количество масла в гидродомкратах и, таким образом, регулируют положение электродов. Ход гидродомкратов ограничен электрическими конечными выключателями и составляет 1000 мм. Скорость подъема при работе с одним насосом равна 0,12—0,15 м/мин и при работе с двумя насосами 0,24—0,3 м/мин.

Водяное охлаждение. Предохранение тех частей руднотермической печи, которые подвергаются действию высоких температур, осуществляется непрерывным охлаждением водой. Для этого применяют две различные системы циркуляции воды: система циркуляции охлаждающей воды и замкнутая система циркуляции умягченной воды.

Система циркуляции охлаждающей воды. Вода в этой системе используется многократно и после нагрева снова охлаждается в градирнях. С помощью этой циркуляционной воды охлаждаются: 1) стенки ванны печи; 2) днище ванны печи; 3) летка для шлака; 4) теплообменник системы умягченной воды.

Система охлаждения умягченной воды. Для охлаждения труднодоступных узлов электрододержателя, подвергаемых большей нагрузке неподвижной вторичной сети после трансформаторов, сетевых головок, прижимных пластин, а также центральной части свода печи, где отсутствует железобетонная футеровка с целью предохранения металлической крышки от нагрева, используется умягченная вода, циркулирующая в замкнутой системе. Конструкция этой системы такова, что позволяет обнаружить любую негерметичность в охлаждаемых элементах раньше, чем произойдет крупное повреждение. Это особенно важно для устройства токоподвода, охлаждаемые части которого — защитные пластины, защитные рубашки и охлаждающие кольца — находятся внутри ванны печи, а потому трудно контролируются. Повреждение в охлаждающей системе определяется сразу по уменьшению объема циркуляционной воды.

Техническая характеристика руднотермических электропечей приведена в табл. 23.

Таблица 23

Техническая характеристика руднотермических электропечей для возгонки желтого фосфора

Наименование	РКЗ-72Ф-М1	РКЗ-48Ф-М1
Номинальная мощность печи, кВА . .	72 000	48 000
Пределы вторичного напряжения, В	652—500—148	500—409—100
Максимальный ток электрода, А . . .	92 000	70600
Количество фаз электропечи	3	3
Частота тока, Гц	50	50
Тип электрода	Самоспекающийся	Самоспекающийся
Диаметр электрода, мм	1700	1400
Число электродов	3	3
Изменение длины электродов, мм . . .	4800	4000
Скорость перемещения электрода, м/мин	0,5	0,5
Ход электрода, мм	1000	1000
Число контактных щек на электроде	12	12
Диаметр кожуха (внутренний), мм . .	12 000	10 450
Диаметр плавильного пространства, мм	10 200	8500
Глубина ванны, мм	5650	4900
Число шлаковых леток	2	2
Число феррофосфорных леток	2	2
Расчетный расход охлаждающей воды (в м³/ч):		
а) химочищенной	610	550
б) технической	210	
Расчетная масса металлоконструкций, т	400	300

Печи производства карбида кальция

Общие сведения. Технический карбид кальция получают в руднотермических печах, где окись кальция и углерод взаимодействуют в электрической дуге согласно уравнению:

$$CaO + 3C = CaC_2 \quad -465{,}99 \text{ МДж}$$

Процесс происходит с поглощением большого количества тепла, выделяющегося при прохождении электрического тока через слой загруженной шихты, расплава от электродов к поду печи, а также за счет тепла, выделяемого электрической дугой. Карбидные печи работают как дуговые печи сопротивления.

Скорость образования карбида зависит от ряда факторов:

1) физико-химических свойств извести;

2) углеродистого материала (плотность, реакционная способность, размер кусков, наличие примесей и т. д.);

3) электрических параметров печи (температурного режима, режима сливов);

4) условий эксплуатации.

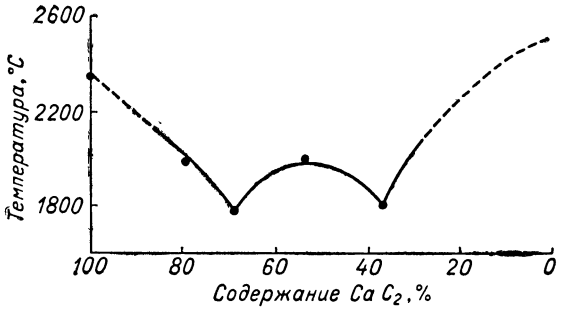


Рис. 31. Зависимость температуры плавления технического карбида кальция от содержания в нем CaC_2.

Начальная температура образования карбида кальция 1619—1800 °С. Обычно процесс проводят при 1950 °С. При дальнейшем повышении температуры начинается испарение карбида кальция и разложение его на металлический кальций и углерод.

Важнейшей характеристикой технического карбида является температура плавления. Она изменяется в зависимости от состава. Чистый карбид кальция плавится при 2300 °С, выпускаемый из печи и содержащий примерно 80% CaC_2, имеет температуру 1800—2000 °С.

На рис. 31 показана зависимость температуры плавления технического карбида кальция от содержания в нем чистого CaC_2.

Как видно из рис. 31, технический карбид кальция имеет две эвтектические точки плавления. Первая соответствует 65% CaC_2 и 32% CaO, а вторая — 35,6% CaC_2 и 64,4% CaO. На температуру плавления карбида кальция оказывают влияние не только содержание извести (CaO), но и окиси алюминия (Al_2O_3), двуокиси кремния (SiO_2) и окиси магния (MgO).

Теплоту образования карбида кальция в расчетах обычно принимают равной 465,99 МДж.

При получении карбида кальция реакции протекают между расплавом $CaC_2 \cdot CaO$ и твердым С, поэтому для повышения однородности шихты и улучшения взаимодействия реагентов сырье перед загрузкой

в печь дробят, отбирая после отсева куски определенных размеров (известь 5—50 мм, сырье, содержащее углерод, 2—30 мм). Затем дробленый материал смешивают в определенных соотношениях. Размеры кусков шихты, равномерность их измельчения и качество смешения оказывают большое влияние на скорость и полноту взаимодействия реагентов.

Технический карбид кальция всегда содержит значительное количество примесей, перешедших из сырья, а потому имеет темно-серый цвет и объемную массу до 2,7 г/см³ и более.

Технический карбид кальция имеет следующий состав (в %):

CaC_2	78,19	SiO_2	2,65
CaO	16,57	S	0,08
MgO	0,06	P	0,02
$Fe_2O_3+Al_2O_3$	2,00	C	0,43

Исходное сырье в производстве карбида кальция — обожженная известь, антрацит или кокс.

Для получения высококачественного карбида кальция необходимо, чтобы все сырье отвечало заданным требованиям (по составу и физическим свойствам). Используют только чистые известняки следующего состава (в %):

$CaCO_3$	Не менее	96
MgO	Не более	0,6
SiO_2	»	2,0
$Fe_2O_3+Al_2O_3$	»	1,0
P_2O_5	»	0,05
S	»	0,35

Известняк должен иметь плотное мелкокристаллическое равномернозернистое строение.

Антрацит. Содержание углерода в антраците колеблется от 90 до 95%, содержание водорода от 2 до 4%, а сумма кислорода и азота составляет от 3 до 3,5%.

Для производства карбида кальция принимаются только мягкие сорта антрацита с объемной массой не выше 1,45 кг/м³, содержащей (в %):

Зола	Не более	7,0
Летучие соединения	»	8,0
Влага	»	4,0
Сера	»	1,5
Фосфор	»	0,04

Кокс применяют металлургический или доменный. Металлургический кокс имеет следующий состав (в %):

Углерод	83,54
Зола	До 12
Влага	5,0
Сера	До 0,5
Фосфор	0,5

Средние удельные расходы следующие:

Электроэнергия	2700—3500 кВт
Известь	910—950 кг/т
Кокс	500—550 »
Электроды	15—20 »

Состав печного газа (в %) закрытых карбидных печей следующий:

	I	II	III
CO	79,3	86,0	85
H_2	11,5	5,0	6,0
CH_4	2,1	0,55	0,2
CO_2	0,8	2,0	2,0
O_2	0,2	0,2	0,35

Температура газа под сводом 382—430 °С.

Классификация печей. Печи, применяемые в карбидном производстве, по технологическому назначению можно разделить на следующие виды:

а) шахтные (для обжига известняка) — в них получают сырье для производства карбида кальция;

б) вращающиеся для обжига гранулированного шлама «сухих» ацетиленовых генераторов;

в) карбидные для получения карбида кальция.

Карбидные печи по конструкции можно разделить на: 1) открытые, 2) полузакрытые и 3) герметичные.

По форме ванны бывают прямоугольные и круглые. А печи с круглой ванной могут быть стационарными и вращающимися.

В *открытых печах* выделяющиеся реакционные газы сгорают на слое загруженного сырья. Такие печи оборудуют приспособлениями и устройствами для отвода сильно запыленных продуктов сгорания в вытяжную трубу.

В *полузакрытых печах* удается собрать 35—50% реакционного газа при помощи газовых коллекторов. Этот газ имеет следующий состав (в %):

CO	55—60	CO_2	2,0
H_2	10	N_2	28—33

При наличии укрытия мощных печей удается собрать до 60—70% реакционных газов.

Среднегодовые расходные коэффициенты на 1 т 75% CaC_2 следующие:

Расход электроэнергии	2850 кВт·ч
Расход извести (CaO в извести 95%)	922 кг
Расход кокса отсеянного (C ~85%)	522 »
Электродной массы	21 »
Электроды прожига	0,12 »
Промышленная вода	136 м³
Железо прутковое	152 кг
Железо кожуховое	1,9 »
Лента стальная	0,04 »

Печь карбидная полузакрытая. Карбидная печь представляет собой реактор, где одновременно протекают химико-технологические и электротермические процессы, тесно связанные между собой.

Конструкция руднотермической карбидной печи мощностью 60 МВА приведена на рис. 32 и 33.

Печь прямоугольная с полузакрытой ванной и прямоугольными самоспекающимися электродами непрерывного действия, расположенными линейно и с подвижной ванной. Печь состоит из следующих основных элементов.

Ванна печи. Печь имеет прямоугольную ванну с округленными углами. Футеровка стенок ванны выполняется блоками из плавленого корунда. Блоки предварительно не обрабатываются и идут на кладку сразу после литья. Зазор между блоками принимается минимальным, практически он составляет 10—12 мм. Кладка осуществляется на порошке корунд (экораль) тониной 0,2 мм на жидком стекле. Модуль жидкого стекла 1,34. Верхний пояс стенки и нижний выкладываются из высокоглиноземистого шамотного кирпича. Подина ванны футеруется углеродистыми блоками, уложенными на коксовую пыль размером 0,2—1 мм. Толщина футеровки стенок 800 мм. Зазор между футеровкой и кожухом ванны 70 мм забивается шлаковатой. Температурное расширение корунда поглощается за счет кладки углов ванны печи, которые выкладываются не по контуру кожуха, а с зазором и засыпается порошком корунда. Зазоры и слой изоляции из шлаковаты позволяют футеровке нормально расширяться без деформации стенок.

Между футеровкой из углеродистых блоков имеется слой сажи любого типа толщиной 50—100 мм. Это позволяет увеличить срок службы подовых блоков, повысить тепловой к. п. д. в зоне реакции, улучшить качество карбида, уменьшить расход электроэнергии на 50—80 кВт·ч на 1 т карбида кальция и способствует лучшему разливу его.

Подина печи имеет уклон к центру ванны. На боковой стенке ванны для слива карбида кальция установлена чугунная водоохлаждаемая летка. Для забивки летки карбидом кальция применяют пневматическую забойку. В подине имеется летка для слива ферросилиция. Слив карбида кальция во вращающийся барабан производится по графику: 20 мин слив и 10 мин перерыв. Слив ферросилиция производится через 10 суток. Шуровка летки производится подвесной шуровочной машиной с одним прутком.

Футеровка ванны для придания механической прочности заключена в металлический кожух, выполненный из сварного стального листа.

Кожух ванны опирается на металлическую опору, выполненную из сварного профильного проката. Ванна печи подвижная с электрическим приводом. Ход ванны 800 мм в сутки (400 мм вправо и 400 мм влево). На кожух ванны устанавливается песочный затвор. Верхнюю часть кожуха охлаждают водой.

Заделка летки производится специальным аппаратом, конструкция которого приведена на рис. 34.

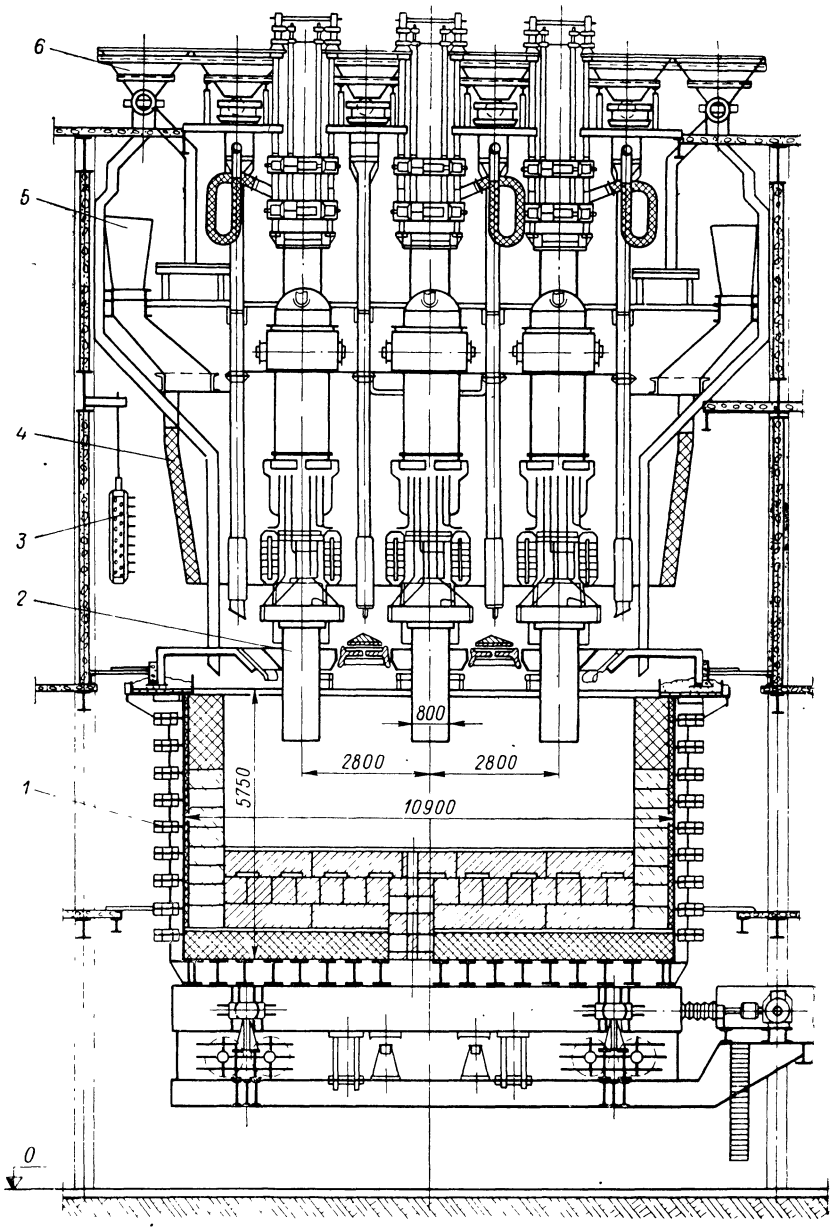


Рис. 32. Печь карбидная полузакрытая 60 МВА (продольное сечение):
1 — ванна печи; *2* — электрод; *3* — короткая сеть; *4* — зонт печи; *5* — отсасывающий трубопровод; *6* — загрузочный бункер.

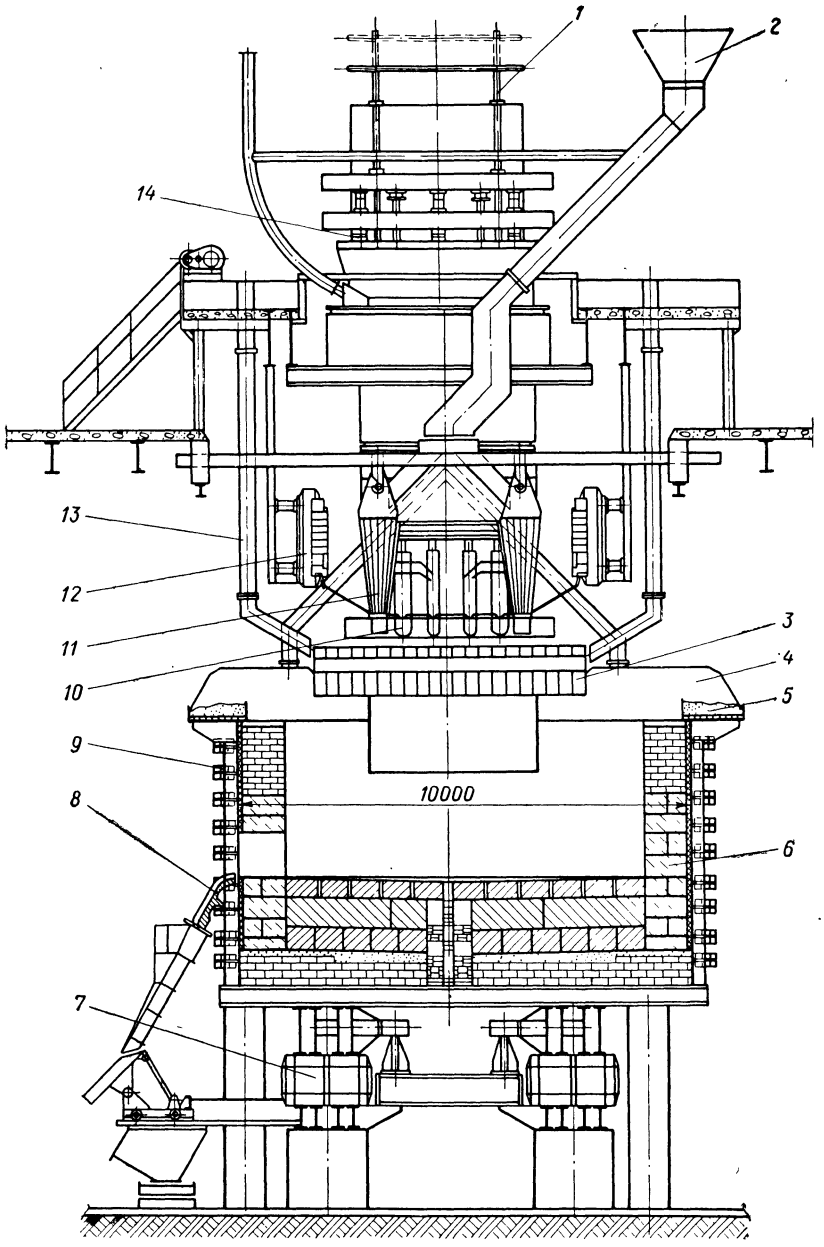


Рис. 33. Печь карбидная полузакрытая 60 МВА (поперечное сечение):
1 — электрод; *2* — бункер; *3* — перекрывающий мостик; *4* — перекрытие печи; *5* — песочный затвор; *6* — футеровка ванны; *7* — катки; *8* — летка; *9* — кожух; *10* — контактные плиты; *11* — качающаяся течка; *12* — короткая сеть; *13* — газоход; *14* — механизм передвижения электрода.

Укрытие ванны печи. Для создания газоплотности ванны ее сверху укрывают специальной водоохлаждаемой конструкцией. По периметру укрытия имеются борта из сварного металлического листа с ребрами жесткости, которыми она входит в песочный затвор, установленный на кожухе ванны. Необходимость песочного затвора вызвана возможностью передвижения ванны печи. В укрытия ванны установлены литые водоохлаждаемые мостки для перекрытия печи.

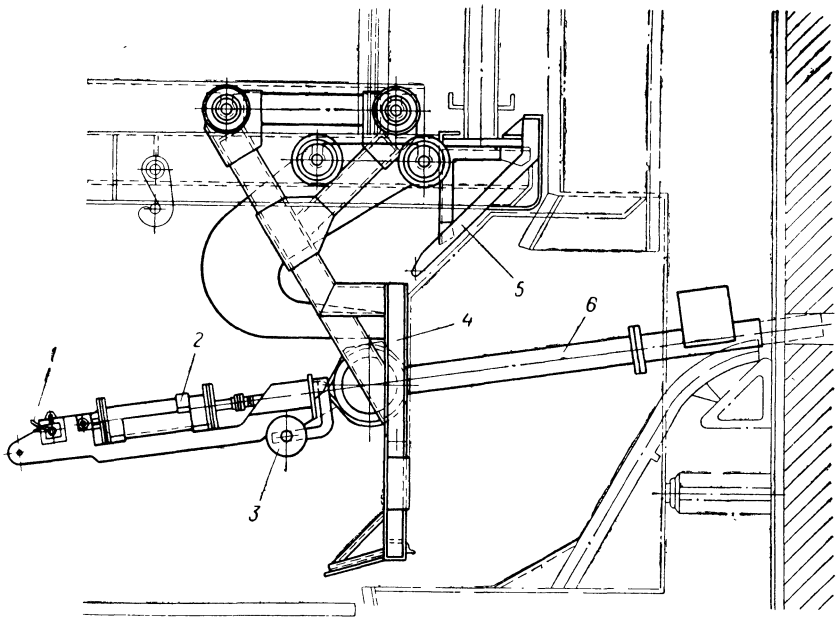


Рис. 34. Установка для заделки летки:
1 — ручное управление; *2* — пневмоцилиндр; *3* — уравновешивающий груз; *4* — передвижной щит; *5* — водоохлаждаемый экран; *6* — труба.

Укрытие ванны подвешивается к строительным конструкциям с помощью металлических штанг. Из-под укрытия ванны осуществляется отбор реакционного печного газа и подача его к газосборникам.

Зонт. Над укрытием ванны печи установлен зонт для вытяжки реакционных газов. Зонт выполнен металлическим сварным из листовой стали и футерован диатомовым кирпичом, толщина футеровки 120 мм. Зонт крепится к металлической строительной опорной конструкции из профильного проката. Для обеспечения электрозащиты стяжные болты проходят через миканитовые шайбы и втулки. Конструкция зонта собирается из панелей различных конфигураций и имеют отверстия для прохода шин короткой сети, штанг пневматического привода, течек и т. д.

Водоохлаждаемое перекрытие ванны. На ванну устанавливают и крепят водоохлаждаемое перекрытие, предназначенное совместно с зонтом обеспечивать герметизацию печи. Перекрытие состоит из щитов различной конфигурации, которые практически закрывают

все пространство зонта, за исключением мест прохождения электрододержателя и его механизмов.

Загрузочные устройства ванны печи. Подача шихты в ванну печи осуществляется при помощи системы неподвижных и качающихся течек в восьми точках.

Над печью расположены четыре бункера для шихты. Шихта в эти бункера подается от общих бункеров для кокса и извести. Кокс и известь взвешиваются автоматическими весами. Бункера снизу имеют шиберные и пневматические секторные затворы, к которым крепятся неподвижные транспортные течки. Подача шихты в ванну печи осуществляется непрерывно по транспортным течкам, имеющим перекидной клапан, далее разветвляется на два рукава и поступает к загрузочным литым качающимся течкам. Они оканчиваются над укрытием ванны на расстоянии 500 мм от него. Качающиеся течки приводятся в движение пневмоцилиндром. Шихта через отверстие в укрытии ванны под углом естественного откоса поступает между электродами. Корректирующая известь периодически подается через течки.

Электроснабжение печи. Передача электроэнергии в ванну печи осуществляется с трансформатора по короткой сети через восемь контактных плит к электроду. Всего установлено три электрода.

Для создания контакта между электродом и плитами установлены нажимные балки, соединенные между собой шарнирно. Плиты поджимаются к электроду с помощью гидравлического нажимного устройства.

Мощность трансформатора: на Δ/人 от 290 до 130 В, на 人/人 от 167,4 до 75 В.

Сила тока с высокой стороны 315—141 А и 182—82 А. Сила тока с низкой стороны 119 450 А. Разность напряжения при регулировании нагрузки допускается в 100 В, что соответствует 17 ступеням. Короткая сеть выполнена из медных шин.

Непрерывный самоспекающийся электрод имеет прямоугольное сечение с размерами 3200 × 800 мм и состоит из стального кожуха с радиальными ребрами, выступающими внутрь; в кожух набивается электродная масса; эта масса при нагревании переходит в пластическое состояние. Электродная масса представляет смесь прокаленного антрацита (или смесь антрацита и кокса) и связующего смеси каменноугольной смолы и пека; наполнитель и связующее смешивают в соотношении 4 : 1.

Антрацит и связующее смешивают в горячем состоянии и разливают в формы. Расход электродной массы составляет около 2% от количества выпускаемого карбида кальция. По мере расходования электрода сверху наращивают новые секции. Масса кожуха составляет 3—10% от массы всего электрода.

Углеродсодержащие газы, проходя через нагретую, частично обожженную часть электродов, подвергаются крекингу, в результате которого образуется пироуглерод, а остаточные газы отводятся вместе с печными газами. После обжига пористость электродной массы составляет около 20%, плотность 1,45—1,55 кг/м³, предел

прочности при сжатии достигает 25,0—35,0 МПа. Удельное электрическое сопротивление при 20 °С равно (5,5—8,0) 10^{-3} Ом·см, а температурный коэффициент электросопротивления 0,00003.

Распределение температур по сечению электрода приведено на рис. 35.

Обжиг начинается на расстоянии 1 м от водоохлаждаемых электрододержателей, при этом термическое разложение компонентов связующего протекает наиболее бурно в средней части электрода.

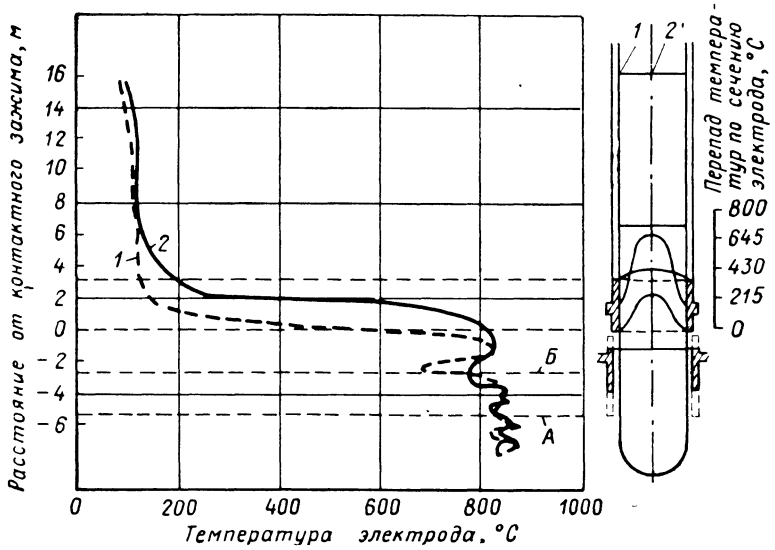


Рис. 35. Распределение температур по сечению электрода:
1 — на расстоянии 124 мм от кожуха; *2* — в центре; линия *А* — максимальная ширина охлаждающей рубашки; линия *Б* — середина охлаждающей рубашки.

В этом месте электрический ток протекает в основном через относительно холодный и, следовательно, высокоэлектропроводный кожух. Сопротивление металлического кожуха увеличивается с повышением температуры, а нижняя часть кожуха в конечном счете оплавляется, поэтому в нижней части электрода ток протекает почти исключительно по телу электрода. Чем больше расстояние от контактных плит, тем выше прочность, плотность и электропроводность электрода. Эта закономерность сохраняется и в радиальном направлении, так как центральная часть электрода дальше отстоит от водоохлаждаемых контактных плит (башмаков).

В процессе обжига внутри контактов электрод дает усадку на 0,5%, что облегчает перепуск электрода по мере расходования. Тепло, необходимое для обжига, поступает как за счет теплопроводности из зоны горения дуги, так и за счет джоулева тепла электрического тока, протекающего через частично прокаленную электродную массу.

Перепуск электродов проводят через каждые 8 ч. Для этого слегка ослабляют несколько контактных плит и электрод опускают

на необходимое расстояние (около 10 см) с помощью двух лент Висдома. Эти ленты изготовляют из мягкой полосовой стали шириной 15 см и толщиной 1 мм и последовательно приваривают по мере расходования электрода к кожуху на противоположных сторонах. Большая часть массы электрода уравновешивается лентами Висдома. Электроды в целом подвешивают при помощи троса, соединенного с подъемным механизмом, приводимым в действие кнопочным пускателем. Подъемный механизм оборудован верхним и нижним ограничителями перемещения.

Для удаления пыли с кожуха электрода предусмотрена его обдувка воздухом, подаваемым из вентилятора ВВД-8М.

Эксплуатируемые в настоящее время полузакрытые мощные карбидные печи имеют ряд существенных недостатков:

1) тяжелые санитарно-гигиенические условия труда обслуживающего персонала;

2) загазованность и запыленность воздушного бассейна;

3) низкий коэффициент использования реакционных газов — 60%;

4) тяжелые условия работы механизмов вследствие высокой температуры и большой запыленности.

Помимо перечисленных недостатков, присущих всем открытым и полузакрытым печам вообще, печи с прямоугольной ванной и прямоугольными электродами имеют еще и чисто конструктивные недостатки:

1) плоские стенки ванны требуют повышенной жесткости, а следовательно, и увеличения металлоемкости;

2) укрытие ванны, состоящее всего из четырех крупных элементов, сложно в эксплуатации и ремонте, кроме того, малое расстояние между шихтой и укрытием служит причиной частых замыканий цепи «электрод — укрытие», что при выходе из строя электроизоляций ведет к прогоранию укрытия;

3) механизм электрододержателя в виде двух балок, соединенных шарниром, при ремонте усложняет разборку и сборку. Работа электрододержателя пока еще не отличается высокой надежностью из-за трудных условий, в которых работают механизмы;

4) механизм перепуска также работает нечетко.

Зажим кожуха электрода должен производиться одновременно в четырех точках при сближении зажимных балок под воздействием пружин. Схема, выбранная авторами проекта, требует высокой точности и параллельности сопрягаемых поверхностей зажимных балок и кожуха электрода, что практически неосуществимо. При зажатии, вследствие неравенства сил трения, удерживающих электрод, последний перекашивается, при этом приходится удалять поперечные связи кожуха: от давления электродной массы стенки деформируются, что приводит к искрению плит и выходу их из строя.

Все перечисленные недостатки устраняются переходом на круглые герметические печи с круглыми электродами.

Печь карбидная герметичная со стационарной ванной. На рис. 36 приведена конструкция руднотермической карбидной печи мощностью 60 МВА.

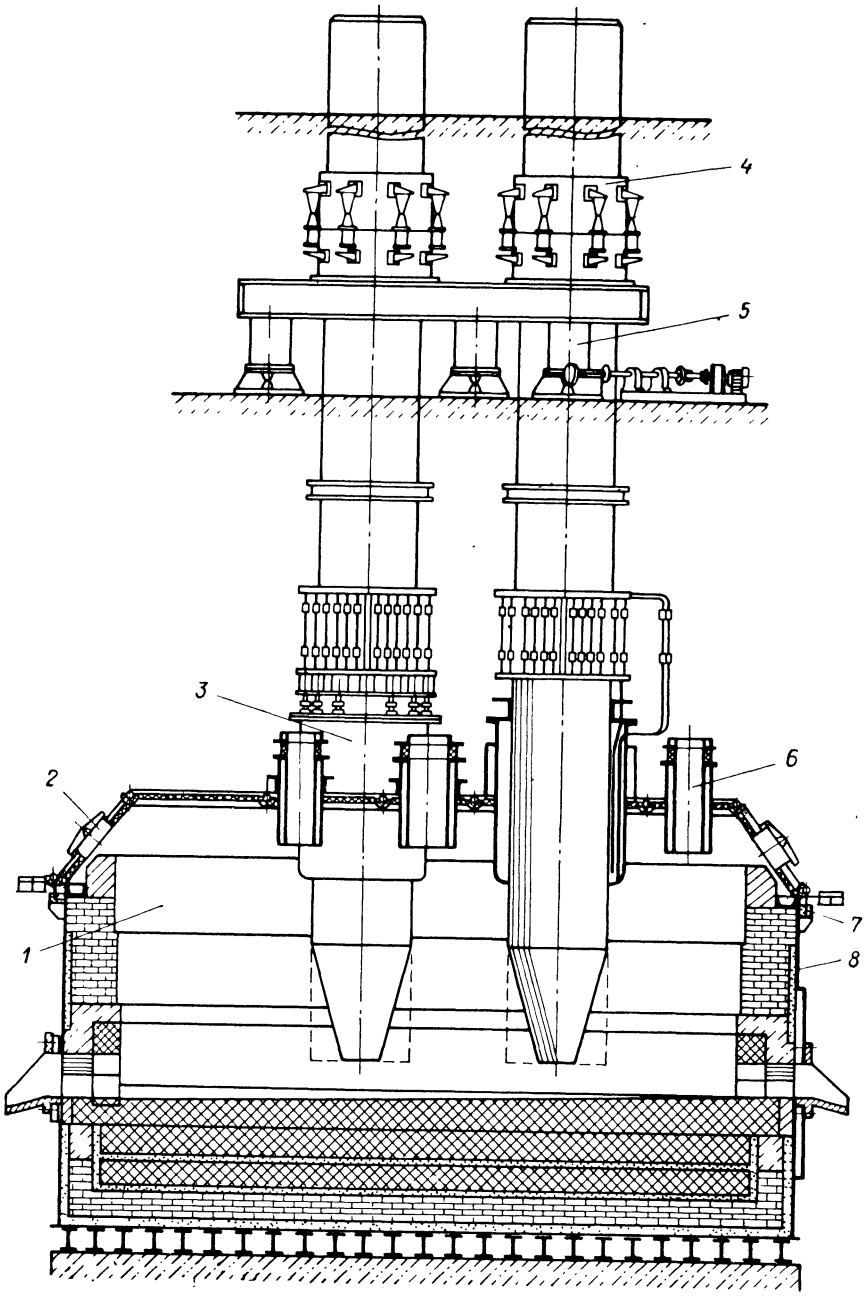


Рис. 36. Печь карбидная герметичная 60 МВА:

1 — ванна печи; *2* — крышка; *3* — электрододержатель; *4* — механизм перепуска электрода; *5* — механизм перемещения электрода с траверсой; *6* — течка; *7* — песочный затвор; *8* — корпус.

Печь круглая, герметичная, с круглыми электродами, расположенными по треугольнику и со стационарной ванной. Печь состоит из следующих основных элементов.

Короткая сеть принята со схемой соединения «компенсированная звезда». Трубчатый пакет выполнен из водоохлаждаемых медных труб диаметром 60/40 до 24 трубки на фазу. Расположены в два ряда с чередованием фаз. Максимальная расчетная плотность тока в трубках $j = 3{,}71$ А/мм^2. Шихтованный трубчатый пакет от трансформатора доходит до половины радиуса свода печи. В этом месте трубки образуют расшихтовку, являющуюся продолжением пакета, и заканчиваются неподвижными башмаками. К каждому неподвижному башмаку крепятся 20 водоохлаждаемых кабелей КВС-1000 по 10 в ряд. С другой стороны гибкие кабели крепятся к подвижным башмакам токособирающего кольца сечением 220 × 150 мм. Плотность тока в кабелях $j = 3{,}5$ А/мм^2.

Каждый электрод имеет по 12 контактных плит, в каждой из которых от токособирающего кольца подходят по две водоохлаждаемых медных трубки диаметром 60/40.

Реактивные и активные сопротивления короткой сети и печной установки. Расчет параметров (x и r) произведен по методу, разработанному ЛенНИИГипрохимом, результаты расчета сведены в табл. 24.

Таблица 24

Значение реактивных и активных сопротивлений печной установки мощностью 60 МВА

Участок	Реактивные сопротивления		Активные сопротивления	
	$x \cdot 10^{-3}$ Ом	%	$r \cdot 10^{-3}$ Ом	%
Трансформатор	0,030	8,90	0,0350	31,2
Короткая сеть	0,306	33,30	0,0135	12,0
в том числе:				
трубчатый пакет	0,044	4,90	0,0095	8,5
гибкие ленты	0,076	8,44	0,0013	1,1
трубки гибкой части	0,180	19,96	0,0027	2,4
Ванна печи с электродами	0,520	57,80	—	—
Переходное сопротивление контактная щека — электрод	—	—	0,0296	26,5
Сопротивление электрода от середины контактных щек на длине 0,65 м	—	—	0,0340	30,3
Сопротивление на фазу	0,900	100,00	0,1120	100,0

Ванна печи круглая, цилиндрической формы. Такая форма принята для улучшения изготовления металлического кожуха, для удешевления футеровочных работ и для увеличения пространства ванны и, следовательно, производительности печи.

Кроме того, гладкий цилиндрический кожух менее металлоемок, чем конический. Мощные связи, которые появляются при конической форме кожуха для ужесточения конструкции, уменьшают

податливость стенки при тепловом расширении футеровки, что приводит к появлению местных перенапряжений.

Размеры ванны (в мм):

Внутренний диаметр	10 500
Глубина ванны	3200
Толщина футеровки подины	2000
Толщина футеровки стенки	850
Наружный диаметр печи	12 200
Толщина обечайки ванны	25

Подина ванны выложена угольными блоками размером 550 × × 550 мм. Толщина угольной кладки 1650 мм. Между вторым и третьим рядом блоков расположен теплоизоляционный слой из угольной крошки. После общей кладки угольных блоков имеется еще один теплоизоляционный слой из угольной крошки. Ниже кладка пода выполнена из шамотного кирпича. Между шамотной кладкой и стальным днищем имеется слой термоизоляционной засыпки из шамотной крошки.

По внутреннему периметру ванны до высоты 1200 мм от пода имеется обрамляющий поясок из угольных блоков, заделанных в паз, с подовыми блоками для предотвращения прорыва ферросилиция через футеровку. Подслой выполнен из корундовых блоков.

Верхняя часть стенки ванны выложена шамотным кирпичом. Между шамотом и кожухом ванны имеется слой асбеста.

Под ванны имеет уклон 1 : 50 в сторону летки для слива ферросилиция.

Ванна стоит на двутавровых балках, обеспечивающих доступ для осмотра и ремонта днища.

Ванна печи имеет две летки для слива карбида кальция и одну — для слива ферросилиция. В местах установки леток на стенке кожуха имеются водоохлаждаемые карманы. Летки для слива карбида кальция также охлаждаются водой.

Крышка печи. Конструкция и конфигурация крышки печи определяются следующими условиями:

1. Увеличением свободного объема печи (для чего крышка выполнена с конической боковиной и приподнята на 1300 мм от ванны);

2. Герметизацией печи (для чего крышка снабжена кольцевым ножом-обечайкой, входящим в песочный затвор корпуса ванны);

3. Герметизацией узла прохождения электрода через крышку (для чего крышка снабжена тремя гидрозатворами для патронов электрододержателя).

Эта конструкция позволяет утопить в свод контактные щеки, что сокращает длину рабочего конца электрода и уменьшает активные и реактивные потери.

Вследствие высокой температуры внутри печи внутренняя поверхность крышки защищена торкрет-массой, состоящей из 70% шамотной крошки, 20% жидкого стекла и 10% огнеупорной глины.

Собственно металлическая конструкция крышки выполнена из немагнитной стали Х18Н10Т и представляет собой кессон с водяным охлаждением каждой из секций. Конструктивно крышка состоит

из конической боковины и верхней крышки, которая имеет 19 электроизолированных секторов, уложенных на водоохлаждаемый каркас из труб. В крышке 3 входа для электрододержателей, 13 штуцеров для загрузки и два — для газов. На конической боковине имеется шесть лазов 600 × 1000 мм. Кроме того в крышке три электрически изолированных друг от друга сектора.

Электрододержатель. В целях обеспечения лучшей сохранности в условиях воздействия горячей среды и пламени механизмы электрододержателя закрыты водоохлаждаемым кожухом из антимагнитной нержавеющей стали. В пространстве между кожухом и оболочкой электрода подается инертный газ для создания противодавления, препятствующего выбиванию СО из рабочей зоны печи и попадания воздуха в печь, что может привести к образованию взрывоопасной смеси газов. Помимо этого, обдув предохраняет поверхность электрода от оседания пыли и образования диэлектрического слоя, ухудшающего контакт между контактными плитами и электродом.

Контактная плита — литая, со змеевиком из двух параллельных ветвей. Ток к контактным щекам подводят медными водоохлаждаемыми трубами. Прижим контактных щек осуществляется пружинно-гидравлическим рычажным механизмом.

В целях уменьшения размеров механизма и устранения напряжений скручивания и изгиба в элементах прижимного устройства, ось рычажной системы расположена параллельно от электрода. В момент приложения усилия ось работает на растяжение под воздействием пакета тарельчатых пружин, при этом рычажное устройство прижимает щеку к электроду с удельным давлением 50 кПа. При сжатии пружин гидравлическим цилиндром ось перемещается в вертикальном направлении и рычажное устройство отводит щеку от кожуха электрода.

Механизм перемещения электрода представляет собой систему двух гидравлических домкратов, шарнирно соединенных с траверсой. Величина перемещения электрода 600 мм.

Подъем электрода осуществляется подачей масла в гидродомкраты, а опускание — за счет собственной массы.

Для достижения синхронной работы двух гидродомкратов плунжеры выполнены в виде гайки, а в полость гидродомкратов вмонтированы винты, приводимые во вращение общим приводом. Таким образом, перемещение плунжера ограничено скоростью вращения винтов.

Механизм перепуска электрода. Механизм перепуска состоит из двух колец — верхнего и нижнего. Верхнее кольцо опирается на нижнее через гидроцилиндры. Величина хода гидроцилиндров — 200 мм. Кольца снабжены устройством, зажимающим электрод. Прижим обрезиненных щек к кожуху электрода осуществляется пневматическими подушками, в которые подается воздух под давлением 35 кПа.

Перепуск производится при отжатии одного из колец и осуществляется в ту и другую сторону с помощью связывающих колец гидроцилиндров.

Определение параметров карбидной печи. *Выбор тока и напряжения.* Известно, что каждой мощности печной установки соответствует определенное оптимальное значение тока в электродах $I_э$.

На рис. 37 приведена кривая зависимости тока $I_э$ от величины сетевой мощности, приходящейся на один электрод $P_с$, построенная на основании теоретических расчетов с учетом данных работы большого количества печей.

В зависимости от условий электроснабжения значения $\cos\varphi$ будут лежать в пределах 0,88—0,92 и соответственно сетевая мощность печной установки составит 52,8—55,2 МВт. Таким значениям сетевой мощности соответствуют по кривой рис. 37 токи в пределах

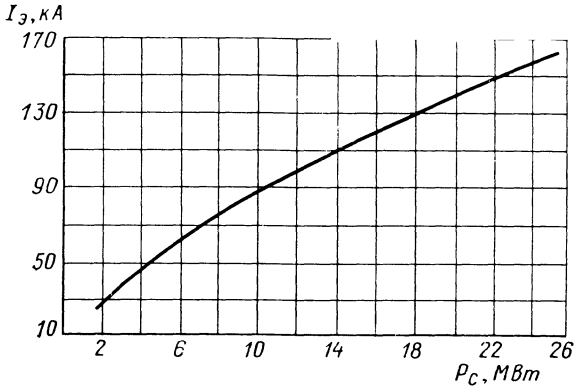


Рис. 37. Зависимость тока от сетевой мощности на один электрод.

125—132 кА. С учетом возможных отклонений технологического процесса от оптимальных величин на основании статистических данных, приняты следующие величины токов в электродах в диапазоне постоянной мощности:

$$I_{э.\,мин} = \frac{126}{1{,}1} = 115 \text{ кА}; \quad I_{э.\,макс} = 132 \cdot 1{,}06 = 140 \text{ кА}$$

Этим токам будут соответствовать следующие значения линейных напряжений:

$$U_{л.\,макс} = \frac{60}{3 \cdot 115} = 330 \text{ В}; \quad U_{л.\,мин} = \frac{60}{3 \cdot 140} = 247 \text{ В}$$

Среднему значению тока 126 кА соответствует 274 В.

Определение диаметра электрода ($D_э$) и диаметра распада ($D_р$). В связи с возросшей единичной мощностью карбидных печей и трудностью создания и эксплуатации электродов диаметром выше 1500—1600 мм в последние годы идут по пути увеличения плотностей тока в электродах, достигающих 6,3—7,3 А/см². В связи с этим обстоятельством выбран диаметр электрода $D_э = 1600$ мм, при котором максимальная плотность тока достигает 7 А/см² (соответственно току

140 кА). При среднем значении $I_э = 126$ кА рабочая плотность тока в электроде составляет 6,3 А/см².

Диаметр распада электродов $D_р = KD_э$ (где коэффициент $K = 2{,}5—2{,}9$). Принимая $K = 2{,}7$, получаем $D_р = 2{,}7 \cdot 1600 = 4300$ мм.

Расчет внутреннего диаметра ванны $D_в$. Зная диаметр распада электродов, можно определить внутренний диаметр ванны $D_в$ печи на основании как существующих методов расчета, так и на основании практики работы действующих печей:

1. По Келли $D_в = 2{,}3S$ (где S — расстояние между центрами электродов). В нашем случае $S = 3730$ мм. Следовательно, $D_в \approx 8600$ мм.

2. По Пашкису $D_в \approx 6D_э$. В нашем случае $D_в = 6 \cdot 1600 = 9600$ мм.

3. По методике ВНИИЭТО, $D_в = D_р + 3{,}4D_э$. В нашем случае $D_в = 4300 + 3{,}4 \cdot 1600 = 9700$ мм.

4. По Микулинскому, максимальное значение диаметра ванны для карбидных печей составляет $D_в = 2\,(2{,}8/1{,}73 + 1{,}4)\,D_э$. В нашем случае $D_в = 2\,(2{,}8/1{,}73 + 1{,}4)\,1600 = 9600$ мм.

5. По Гро, исходя из предлагаемой автором плотности тока в тигле 1 А/см² и принимая расстояние от тигля до футеровки 1200 мм (в соответствии с аналогичными данными для мощных прямоугольных печей), получается внутренний диаметр ванны печи 10 700 мм.

6. На основании изучения габаритов действующих карбидных печей установлены значения расстояний от электродов до стенки ванны печи. Оказалось, что для круглых карбидных печей большой и средней мощности отношение этого расстояния к диаметру электрода (f) составляет в среднем 1,03; а для прямоугольных печей отношение расстояния от узкой стороны электрода до внутренней стенки печи к эквивалентному диаметру электрода составляет 1,07.

Принимая значение величины $f = 1{,}07$, получим значение внутреннего диаметра ванны $D_в = 9320$ мм.

Из приведенных выше расчетов видно, что по большинству методов диаметр ванны составляет 9000—9700 мм. Только метод Гро дает более высокие значения диаметра ванны. Этот метод, основанный на расчетной величине плотности тока в тигле с прямоугольной ванной, приводит к завышенным значениям внутренних размеров ванны печи.

Более представительными, видимо, являются методы, основанные на геометрическом подобии электропечных установок, которые более полно отражают практику эксплуатации карбидных печей. При этом важно, чтобы при использовании этих методов расчетов габаритов ванны печи были аналогичной конструкции и плотности тока в электродах были бы соответствующими. При установлении окончательного размера внутреннего диаметра печи ориентировались на данные современных мощных круглых герметичных печей, у которых максимальная плотность тока в электродах достигает 6—6,5 А/см², т. е. величин, близких к принятым для описанной печи.

Если принять внутренний диаметр ванны в соответствии с методом геометрического подобия, то он окажется равным 9500 мм. При этом отношение $D_э$ к расстоянию от электрода до стенки футеровки равно 1,12. В этом варианте $D_в$ = 9500. Удельная объемная мощность (до колошника печи) составит 0,244 Вт/см³.

Техническая характеристика печи:

Номинальная мощность печи	60—31,5 МВА
Пределы вторичного напряжения на холостом ходу при схеме Δ/人	300—247÷130 В
Максимальный ток электрода	115+140+140 кА
cos φ	0,88—0,92
Количество фаз электропечи	3
Частота тока	50 Гц
Тип электрода	Самоспекающийся, набивной
Диаметр электрода	1600 мм
Ход электрода	600 »
Скорость перемещения электрода	0,3—0,4 м/мин
Количество электродов	3
Диаметр распада электродов	4300 мм
Внутренний диаметр ванны	10 500 »
Глубина ванны	3200 »
Количество леток	3 (одна для ферросилиция)
Количество загрузочных патрубков	13
Диаметр загрузочных патрубков (кроме центрального)	450
Диаметр центрального патрубка	700 мм
Количество патрубков для выхода газа	2
Диаметр патрубков для выхода газа	700 мм
Давление в электропечи	50 Па
Расход воды на охлаждение	700 м³/ч

Печь карбидная, герметичная с вращающейся ванной. На рис. 38 приведена конструкция карбидной печи с вращающейся ванной мощностью 60 МВА. Конструкция печи подобна описанной ранее герметичной печи. Дополнением является наличие песочного затвора и механизма для вращения ванны.

Конструкция механизма вращения ванны. Механизм вращения ванны состоит из следующих основных узлов:

1) приводного электродвигателя;
2) редукторной передачи;
3) основной зубчатой передачи (конической или цилиндрической), прикрепленной к стальной или железобетонной плите и являющейся основанием ванны печи;
4) центральной цапфы, предупреждающей смещение плиты;
5) ходовых катков;
6) круглого рельса, заложенного в фундаменте печи.

Этот механизм должен иметь автоматическое управление. Учитывая значительные усилия, действующие на привод вращения ванны, а также значительные затраты времени и материальные затраты на ремонт, особенно замену отдельных деталей и узлов, механизм

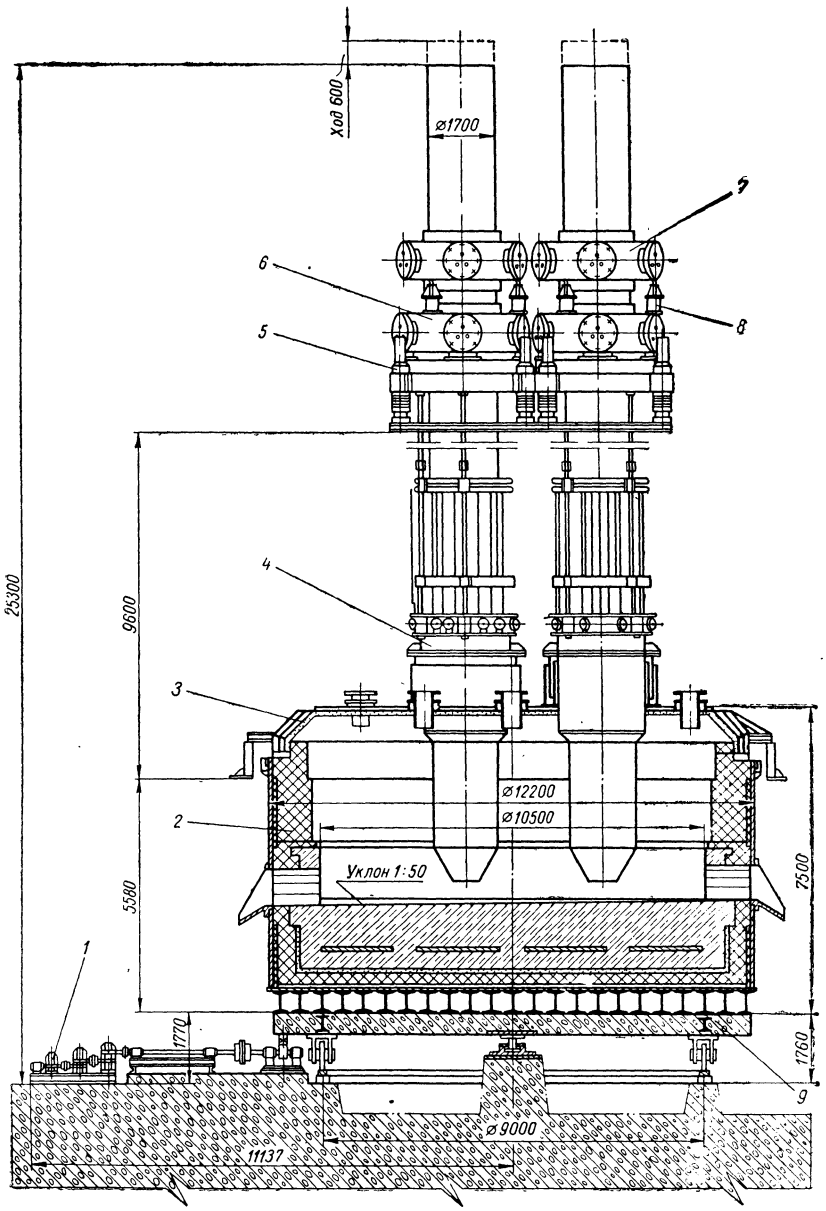


Рис. 38. Печь карбидная герметичная с вращающейся ванной 60 МВА:

1 — механизм вращения ванны; *2* — ванна; *3* — крышка; *4* — электрододержатель; *5* — механизм для перемещения электрода; *6* — механизм для перепуска нижнего кольца; *7* — механизм для перепуска верхнего кольца; *8* — цилиндр для перепуска электрода; *9* — железобетонная плита.

вращения следует выполнять с высокой степенью надежности. Так как по требованиям технологии скорость вращения ванны печи должна изменяться плавно, применяют, как правило, шунтовые электродвигатели постоянного тока мощностью 1,7 кВт с 1000 об/мин (максимально). Снижение частоты вращения электродвигателя осуществляется шунтовым реостатом. Из-за малой скорости вращения ванны необходимое передаточное число редукторной передачи (без основной зубчатой) составляет от 1 000 000 до 200 000, такая передача может быть осуществлена лишь последовательным включением двух редукторов.

Применяют цилиндрические или червячные редукторы. Цилиндрические дешевле, надежнее в работе и легче могут быть выполнены на большую величину передаваемого усилия, однако они более громоздки. Поэтому, как правило, первый редуктор от электродвигателя делают червячным, а второй — цилиндрическим.

По круговому опорному рельсу размещены ходовые катки диаметром 700 мм.

Распределение энергии в печи (в %):

Теплота карбидообразования	54,9
Энтальпия карбида кальция	20,6
Теплота плавления карбида	4,8
Энтальпия отходящего газа	3,2
Другие процессы, требующие тепла (тепло коксования, тепло растворения и пр.)	0,5
Итого	84,0
Потери тепла с водоохлаждением печи и электрооборудования	11,7
Потери при излучении и пр.	4,3
Всего	100

Техническая характеристика карбидной электропечи мощностью 60 МВА с вращающейся ванной следующая:

Номинальная мощность	60 МВА
Пределы вторичного напряжения	300—247 В
Максимальный ток электрода	140 000 А
Количество фаз	3
Частота тока	50 Гц
Тип электрода	Самоспекающийся, набивной
Диаметр электрода	1600 мм
Ход электрода	600 »
Количество электродов	3
Диаметр распада электродов	4300 мм
Внутренний диаметр ванны	10 500 »
Глубина ванны	3200 »
Угол вращения ванны	120°
Скорость вращения ванны	0,1—0,4 об/сутки
Мощность электродвигателя привода ванны	1,7 кВт
Количество леток	3 (1 для ферросилиция)

Количество патрубков для загрузки	13
Диаметр патрубков	450 мм
Количество штуцеров для выхода газа . .	2
Диаметр штуцеров для выхода газа	700 мм
Давление в печи	500 Па
Расход воды на охлаждение в печи	345 м³/ч
Общая масса электропечи	822 т

Печи производства минеральных пигментов

Классификация печей. Термическая, высокотемпературная обработка реакционной смеси, а также возгонка металлов и окисление их паров осуществляется в печах различных конструкций. Печи являются основным технологическим оборудованием в производстве большинства видов пигментов. По цвету получаемых минеральных пигментов печи можно разделить на следующие виды:

а) печи производства белых пигментов;
б) печи производства желтых и красных пигментов;
в) печи производства фиолетовых пигментов;
г) печи производства черных пигментов;
д) печи производства светящихся составов.

В печах производства минеральных пигментов можно проводить только тот технологический процесс, для которого они предназначены.

Печи производства белых пигментов. К белым пигментам, которые получаются с использованием печей, относятся: цинковые и титановые белила, литопон.

Печи производства цинковых белил. *Общие сведения.* Цинковые белила по химическому составу представляют собой окись цинка ZnO, а по внешнему виду это белый порошок, состоящий из частиц размером 0,15—10 мкм и более. Здесь рассматривается сухой способ производства цинковых белил: пары цинка, полученные испарением металла, подвергаются окислению.

Сырьем служит металлический цинк: удельная масса 6,9—7,2 кг/м³, температура плавления 419,4 °С, температура кипения 930 °С, теплота плавления 125,1 кДж и теплота испарения 1624 кДж. Нагретый выше 900 °С цинк сгорает зеленоватым пламенем в окись цинка. Металл, полученный металлургическим методом (марки не ниже Ц-3), содержит 98,7% цинка и до 1,3% примесей (1% свинца и до 0,2% кадмия). Металл, полученный электролитическим способом (марки Ц-0, Ц-1 и Ц-2), содержит до 99,9% цинка и не более 0,1% примесей. Содержание свинца в таком цинке не превышает 0,05% и кадмия 0,02%.

В СССР для производства цинковых белил применяют металлургический цинк марки Ц-3 и для получения белил особо высокого качества (по цвету) — электролитический цинк марки Ц-0, Ц-1 и Ц-2.

Реакция окисления паров цинка протекает экзотермично:

$$Zn + 0{,}5O_2 \longrightarrow ZnO + 357{,}5 \text{ кДж}$$

Кадмий и свинец также испаряются и окисляются:

$$Cd + 0{,}5O_2 \longrightarrow CdO + 251{,}1 \text{ кДж}$$

$$Pb + 0{,}5O_2 \longrightarrow PbO + 221{,}4 \text{ кДж}$$

Испарение цинка и окисление его паров производят в муфельных или вращающихся печах специальной конструкции, в которых цинк испаряют в безкислородной среде, а образовавшиеся пары цинка затем окисляют в окислительных камерах печи.

Печи муфельные. На рис. 39 представлена печь, состоящая из 8 муфелей. Печь состоит из двух камер: рабочей и камеры окисления. В рабочей камере установлены 8 кварцевых муфелей диаметром 170 мм и длиной 1300 мм, которые опираются на огнеупорную футеровку печи и расположены в два ряда. В муфелях производят плавку и испарение цинка. Муфель предохраняет поверхность расплавленного цинка от окисления. Это имеет большое значение для производительности печи, так как чем чище поверхность цинка, тем больше его испаряется при прочих равных условиях.

Муфель с одной стороны имеет форму сферы, а с другой — полукруглое отверстие, через которое в муфель загружают металлический цинк, и из которого выходят пары цинка. Толщина установленных в данной конструкции муфелей равно 12 мм.

Муфели для плавки и испарения цинка подвергаются одновременному воздействию высокой температуры, паров цинка и окиси цинка, и поэтому срок их службы непродолжителен и составляет от 2 до 10 дней.

При замене муфеля его предварительно нагревают до 800 °С и нагретый муфель быстро переносят в печь для получения белил.

В рабочей камере под муфелями установлены четыре инжекционные горелки для образования горючей газовоздушной смеси из природного газа и воздуха, который горит в керамическом туннеле. Раскаленные газы поднимаются вверх, омывают кварцевые муфели с цинком и через боров, расположенный наверху печи, покидают ее. На борове установлен взрывной клапан. Внизу рабочей камеры предусмотрен лаз для осмотра туннелей и их ремонта. В окислительной камере выходящие из муфелей пары цинка окисляются до окиси цинка за счет воздуха, подаваемого снизу камеры, и покидают камеру через отверстие на крыше печи. Рабочая и окислительная камеры футерованы шамотным кирпичом класса А и теплоизолированы красным кирпичом. Для придания механической прочности и крепления загрузочных дверей футеровка печи заключена в сварной металлический каркас из профильного проката.

На фронтовой стороне печи установлены четыре дверцы, через которые загружают чушковым цинком муфели. Дверцы выполнены литыми из серого чугуна и снабжены керамическими предохранителями от теплового излучения с камеры окисления. Температура в камере горения газа равна 1350 °С, в кварцевых муфелях 1000 °С, температура отходящих газов 1000÷1100 °С. Чем выше температура в печи, тем выше ее производительность.

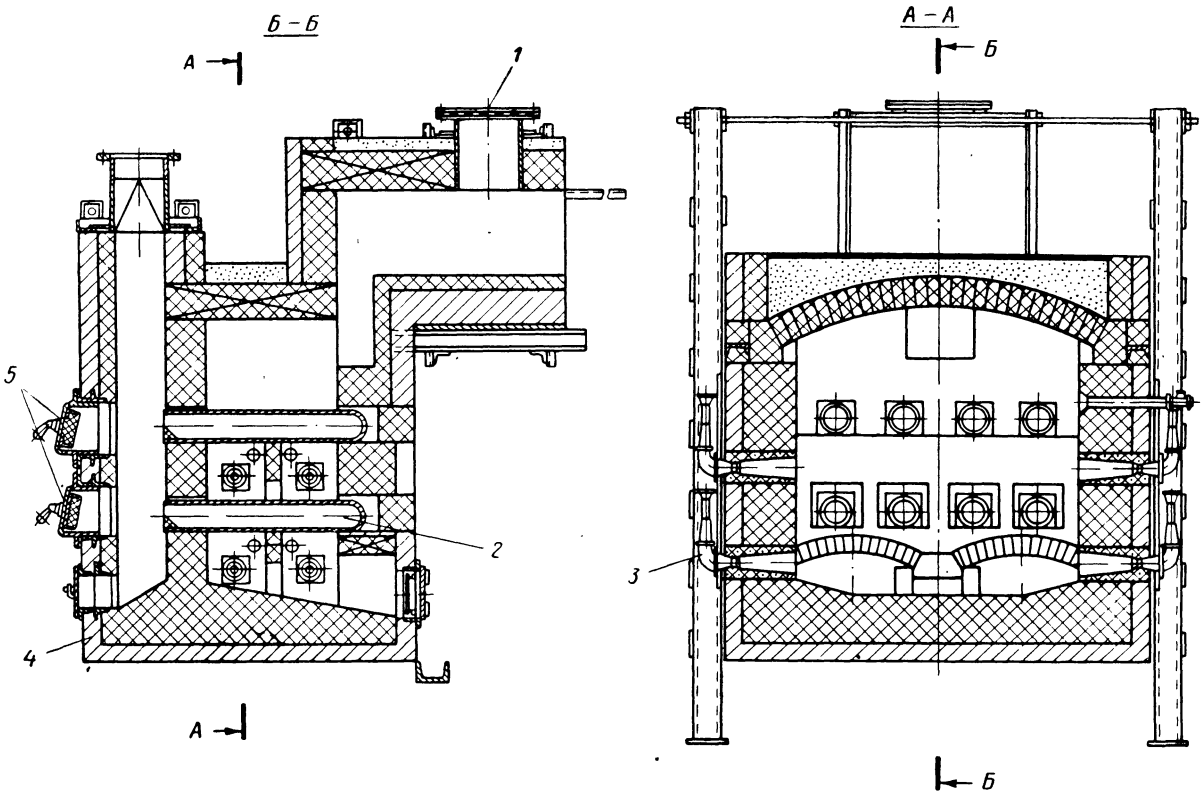


Рис. 39. Печь муфельная:

1 — взрывной клапан; *2* — муфель; *3* — горелка; *4* — футеровка; *5* — дверцы.

Преимущество муфельных печей по сравнению с вращающимися барабанными печами — это большая чистота получаемых цинковых белил из-за отсутствия соприкосновения паров цинка с продуктами сгорания топлива.

Основные недостатки описанной конструкции муфельной печи:

а) периодичность загрузки при непрерывном ходе всего производственного процесса получения цинковых белил;

б) отсутствие возможности регулирования процесса окисления паров цинка;

в) ручная загрузка цинка в муфели;

г) быстрый выход из строя муфелей и необходимость их замены без остановки печи вручную;

д) нарушение режима реакции окисления паров цинка, вследствие неорганизованного и неуправляемого поступления воздуха через загрузочные дверцы окислительной камеры при их открывании для загрузки муфелей и зачистки устьев от окиси цинка.

Печи с вращающимся барабаном. На рис. 40 приведена конструкция вращающейся барабанной печи, где плавление и испарение цинка осуществляется за счет тепла продуктов горения природного газа, сжигаемого непосредственно в барабане, являющимся реакционной камерой.

Печь состоит из футерованного шамотным кирпичом барабана, сжигательного устройства для приготовления горючей газовоздушной смеси и подачи ее на горение в реакционную камеру. В данной печи топливом является природный газ. Окисление паров цинка осуществляется в специальной, футерованной шамотным кирпичом класса А, окислительной камере, за счет воздуха, подаваемого из нижней части камеры. Регулирование количества подаваемого воздуха производится поворотным шибером, установленным в окислительной камере.

Вращение барабана необходимо:

а) для подачи тепла от дымовых газов не только через зеркало испарения цинка, но и от раскаленных стенок барабана, непрерывно погружаемых в расплавленный цинк;

б) для разрушения пленки окиси цинка, образующейся на поверхности жидкого цинка и замедляющей его испарение;

в) для увеличения поверхности испарения, так как жидкий цинк частично увлекается вращающейся поверхностью футеровки барабана.

Вращение барабана обеспечивается приводным механизмом. Барабан покоится на опорных роликах, на которые он упирается двумя бандажами. В футеровке барабана имеются кольцевые пороги. Последние дают возможность поддерживать в ванне расплавленный цинк на постоянном уровне.

Температура газопаровой смеси, поступающей из барабана в окислительную камеру, равна 1000 °С. Суточная производительность печи равна 10 т.

В печи во время работы поддерживается разрежение в пределах 10—30 Па. Такое разрежение обеспечивает продвижение

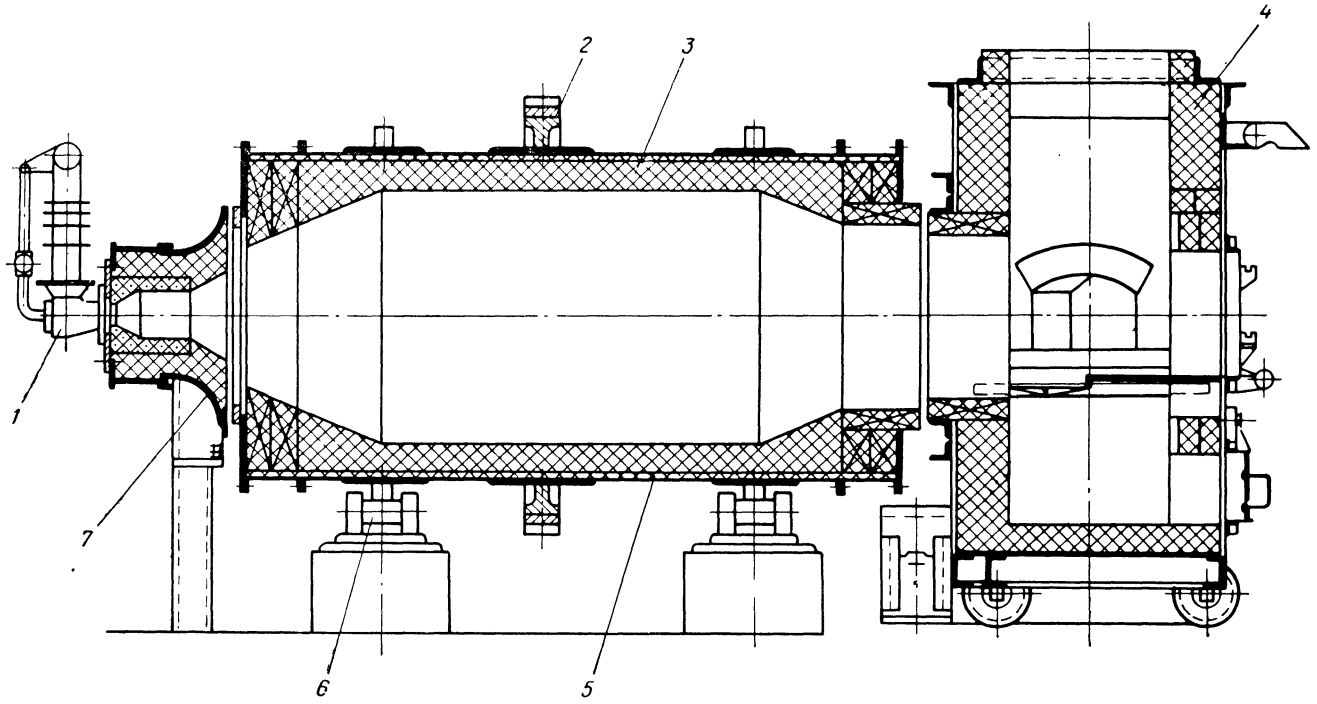


Рис. 40. Печь с вращающимся барабаном:

1 — горелка; *2* — механизм; *3* — футеровка; *4* — откатная тележка; *5* — барабан; *6* — опорная станция; *7* — головка горелки.

в окислительную камеру образовавшихся в печи паров цинка. При бо́льшем разрежении в печь засасывается большое количество воздуха.

Преимущества вращающейся барабанной печи перед муфельными следующие:

а) большая стабильность свойств цинковых белил;

б) исключается расход дорогостоящих муфелей;

в) более простая конструкция.

Некоторые недостатки вращающихся барабанных печей:

а) образование водорастворимых солей из-за соприкосновения продуктов горения топлива с парами цинка;

б) ежесуточная чистка барабана от окиси цинка, частично оседающего на внутренней стенке футеровки барабана;

в) нарастание плотного слоя шлака на стенках футеровки, что требует ежемесячной остановки печи для очистки;

г) необходимость тщательного и точного поддержания оптимальных режимов работы печи, нарушение которого может привести к резкому ухудшению показателей ее и возрастет частота чистки и усложняется их проведение.

Печи производства титановых белил. Основным промышленным методом производства двуокиси титана (титановые белила) является гидролиз растворов сульфата титана и прокаливание полученной окиси титана.

Прокаливание производится с целью удаления из метатитановой кислоты адсорбированных примесей — связанной воды и SO_3, а также кристаллизации частиц двуокиси титана. В результате прокаливания происходит образование пигмента определенного состава с высокими малярно-техническими свойствами и слабой химической активностью.

Удаление воды из метатитановой кислоты происходит при 200—300 °С, а SO_3 при 500—800 °С. SO_3 сообщает метатитановой кислоте и прокаленным продуктам кислый характер. По мере прокаливания и улетучивания SO_3 кислотность уменьшается, но получение нейтрального продукта (с pH = 7) достигается лишь при 850—900 °С.

Прокаливание смеси метатитановой кислоты с минерализаторами (K_2SO_4) или с рутилизирующими добавками (ZnO) в виде пасты производится в противоточных печах с вращающимся барабаном общего назначения (стр. 214).

Печь диаметром 2—3 м и длиной 30 м футерована высокоглиноземистым шамотным кирпичом класса А и обогревается продуктами сгорания мазута или природного газа, проходящими через печь. Начальная температура газов при входе в печь 900—1000 °С, конечная 350—400 °С. Газы, выходящие из печи, направляются в скруббер для улавливания пыли TiO_2 и затем выбрасываются в атмосферу. Время пребывания пигмента в печи составляет 12—14 ч.

Для контролирования и регулирования процесса прокаливания метатитановой кислоты в нескольких точках, расположенных по длине вращающейся печи, устанавливаются термопары, передающие показания на соответствующие приборы при помощи контактных

колец и токосъемников. Вблизи этих точек в барабане печи устанавливаются специальные приспособления для отбора проб прокаливаемого продукта без остановки печи. Все это позволяет автоматизировать процесс прокаливания и осуществлять управление им.

Прокаленный продукт представляет собой почти чистую двуокись титана, которую после охлаждения и размола применяют в качестве пигмента.

Печи производства литопона. Литопон — белое кристаллическое вещество, которое состоит из эквимолекулярной смеси ZnS и $BaSO_4$ с примесью небольших количеств ZnO. Его получают взаимодействием растворов $ZnSO_4$ и BaS:

$$BaS + ZnSO_4 \longrightarrow \underbrace{BaSO_4 + ZnS}_{\text{литопон}} + 100\ \text{кДж}$$

Сырьем для производства сульфида бария служит минерал барит, состоящий в основном из сульфата бария. Сульфид бария получают восстановлением барита; в качестве восстановителя используют различные сорта углей. Восстановление барита углеродом можно представить реакцией:

$$BaSO_4 + 4C \longrightarrow BaS + 4CO \quad -511{,}4\ \text{кДж}$$

Печь с вращающимся барабаном для восстановления барита. Восстановление барита осуществляется во вращающихся барабанных печах общего назначения. Вращающиеся барабанные печи позволяют вести процесс непрерывно и размешивая плав.

Дозировку барита и коксовой мелочи производят тарельчатыми питателями: на 100 масс. ч. барита берут 25—28 масс. ч. коксовой мелочи. Смесь барита с коксовой мелочью тщательно перемешивают и шнековым питателем подают в печь. В производстве BaS применяют печи длиной 22 м и диаметром 1,8 м. Они установлены под углом 2° 30′ к горизонту.

Теплоносителем являются дымовые газы от сжигания мазута или природного газа в специальной откатной головке. Откатная головка футерована шамотным кирпичом класса А и имеет в нижней части форму конуса, куда сливается готовый продукт, а в верхней — свод лучковой формы. На фронтовой стороне откатной головки установлены сжигательные устройства, где осуществляется приготовление горючей газовоздушной смеси или распыливание мазута и его сжигание в откатной головке. Футеровка откатной головки заключена в металлический кожух, который стянут жестким каркасом. Откатная головка установлена с помощью катков на рельсовых путях.

Использование жидкого и газового топлива позволяет автоматизировать регулировку температуры в печи.

Шихты и дымовые газы движутся в печи противоточно. Дымовые газы, обогрев зону реакции, продолжают двигаться дальше навстречу свежей шихте и подогревают ее за счет оставшегося тепла.

Плав на выгрузке имеет вид рыхлой раскаленной докрасна массы. Если обжиг произведен правильно, поверхность плава быстро

темнеет. Неправильно обожженный плав остается раскаленным в течение многих часов; он окрашен в темно-серый цвет и содержит много крупных спекшихся комков.

Для контроля работы печи необходимо периодически производить анализ плава. Количество BaS в плаве колеблется в пределах 65—75%. Кроме BaS в плаве содержится невосстановленный барит, кислоторастворимые соли бария, окислы железа и алюминия и несгоревшая коксовая мелочь. Восстановление $BaSO_4$ продолжается 1—1,5 ч.

Печь с вращающемся барабаном муфельная для прокалки литопона. Отфильтрованный литопон, полученный из жидкостного реактора с мешалкой, не является еще пигментом, так как он не обладает необходимыми техническими свойствами как укрываемость (способность пигмента при окраске закрывать грунтовую поверхность без просвечивания сквозь слой краски), маслоемкость (расход масла на получение пасты из 100 г пигмента) и др. Эти свойства он приобретает в результате прокаливания высушенного литопона-полуфабриката.

Пигментные свойства литопона с повышением температуры прокаливания до 700 °С значительно улучшаются. Однако при увеличении времени прокаливания сверх 1 ч укрывистость литопона начинает понижаться.

Прокалку литопона-полуфабриката проводят во вращающейся муфельной печи, которая работает по принципу противотока.

Конструкция печи приведена на рис. 41. Она состоит из сварного металлического барабана, внутри которого, кроме обычной огнеупорной футеровки, предохраняющей корпус от перегрева и уменьшающей потери тепла в окружающую среду, имеется вторая специальная футеровка из фасонных огнеупорных блоков. Внутри них имеются каналы.

Смонтированные блоки образуют один центральный канал (муфель) и 8 периферийных продольных каналов. Центральный канал является реакционной камерой, где происходит обжиг полуфабриката, по периферийным каналам движутся продукты сгорания газообразного топлива. Газы движутся навстречу материалу. Горючая газовоздушная смесь приготовляется в 8 инжекционных горелках, собранных в сжигательную головку печи. Горение газовоздушной смеси происходит в керамических туннелях и частично в периферийных каналах. Воздух на горение природного газа инжектируется из атмосферы цеха.

Передача тепла от раскаленных газов к литопону-полуфабрикату в центральном канале происходит через стенки периферийных каналов. Применение муфельных печей предохраняет литопон от загрязнения сажей и другими продуктами сгорания газа.

Прокаливание литопона в печи производят при 700—750 °С в течение 45 мин. Вращение барабана производится приводным механизмом, состоящим из электродвигателя, редуктора и малой шестерни, находящейся в зацеплении с большой венцовой шестерней.

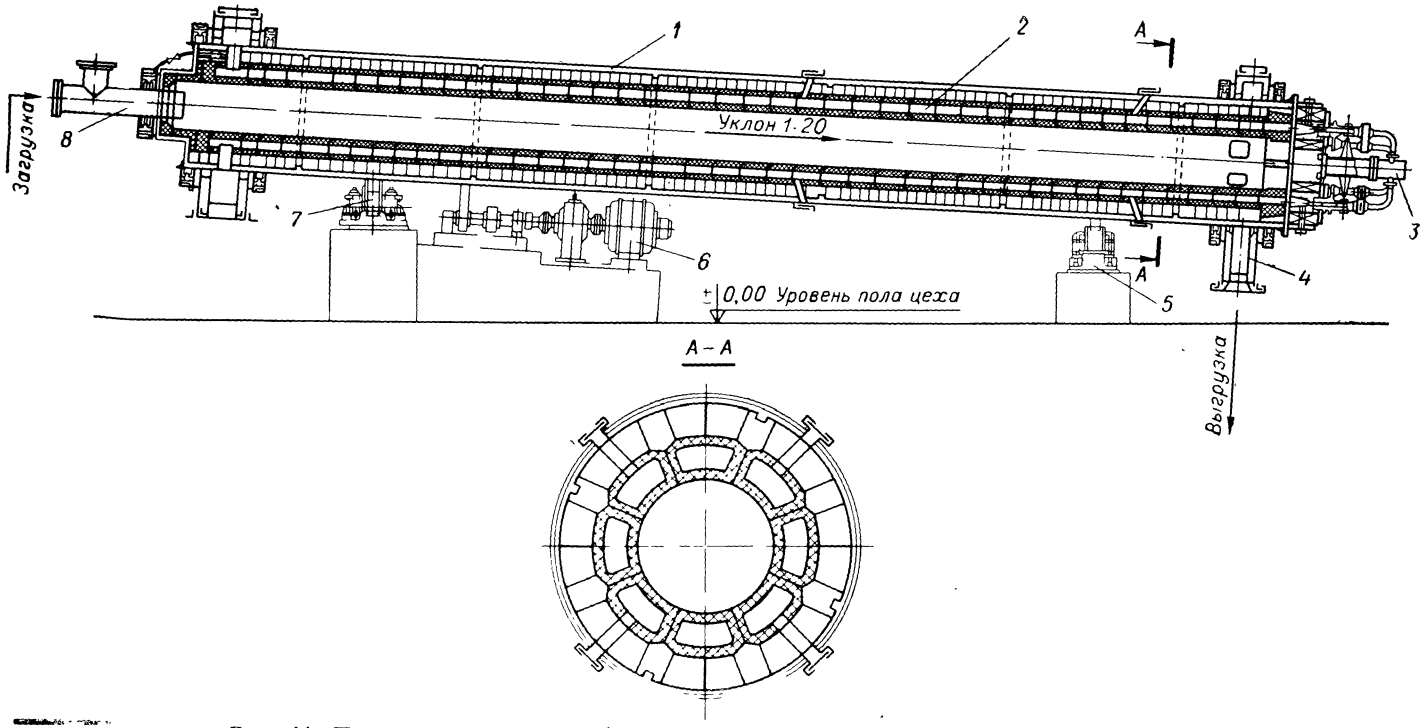


Рис. 41. Печь с вращающимся барабаном, муфельная для прокаливания литопона:

1 — барабан; *2* — фасонный кирпич; *3* — горелочная головка; *4* — устройство для разгрузки; *5* — опорная станция; *6* — механизм привода; *7* — опорно-упорная станция; *8* — устройство для загрузки.

Цилиндрический корпус печи опирается на две опорно-упорные станции, закрепленные на фундаментные колонны. Печь имеет устройства для разгрузки и отвода дымовых газов. Блоки муфеля со стороны сжигательной головки и футеровка печи имеют отверстия, через которые высыпается прокаленный продукт по мере вращения печи в транспортные устройства, а реакционные газы удаляются из муфеля через те же отверстия.

Выгрузочное устройство и устройство для отвода дымовых газов футерованы огнеупорным кирпичом и заключены в металлический кожух, который в нижней части имеет фланцы для отвода газов в дымовую трубу. Устройства для загрузки, выгрузки и отвода дымовых газов имеют контактные уплотнительные устройства для герметизации печи.

В периферийных каналах сделаны регулируемые по сечению отверстия для ввода вторичного воздуха с целью регулирования температуры дымовых газов вдоль реакционной камеры печи.

Печи производства желтого и красного пигментов. О б щ и е с в е д е н и я. Свинец образует с кислородом два окисла: PbO и PbO_2. Окись свинца PbO называется в технике глетом: ее молекулярная масса составляет 223,22; она содержит 92,83% Pb и 7,17% кислорода. Температура плавления окиси свинца 880—890 °С, температура кипения 1470 °С, но уже при 1000 °С PbO заметно испаряется. Существует PbO в виде двух энантиотропных модификаций: тетрагональной красно-коричневого цвета и ромбической желтого цвета. Переход одной модификации в другую происходит при 489 °С.

Технический глет представляет собой мелкокристаллический порошок, цвет которого, в зависимости от структуры и содержания свинца, может быть желтым, серо-зеленым и красноватым.

Смешанный окисел состава $2PbO \cdot PbO_2 (Pb_3O_4)$ или свинцовая соль ортосвинцовой кислоты (сурик) представляет собой мелкокристаллический порошок, имеющий цвет от светло-оранжевого до красного. Сурик содержит 90,67% Pb и 9,33% кислорода. Удельная масса сурика 8,6; молекулярная теплоемкость $c_p = 194{,}4 + 0{,}0095T$.

Принципиальная схема промышленного производства слагается из следующих операций: расплавление чушек металлического свинца в плавильном котле и окисление кислородом воздуха капель расплавленного свинца в окислительном котле. Образующийся глет выносится из окислительного котла воздухом и улавливается путем осаждения в камерах и в воздухопроводах специальной конструкции со шнеком. Полученный глет-сырец в зависимости от назначения далее направляется на размол и упаковку в качестве готового продукта, либо в печи второго обжига для дополнительного окисления содержащихся в нем частиц металлического свинца или, наконец, в суриковые печи, как полуфабрикат для получения свинцового сурика.

П е ч ь г л е т н а я в т о р о г о о б ж и г а предназначена для получения глета специальных марок доокислением частиц металли-

ческого свинца. Конструкция печи приведена на рис. 42. Реакционная камера печи представляет собой муфель цилиндрической формы с плоским дном и сферическим куполом, выполненным из специальных огнеупорных блоков. Внутри муфеля установлена горизонтальная скребковая мешалка, вал которой проходит через под печи и приводится во вращение от приводного механизма, установленного

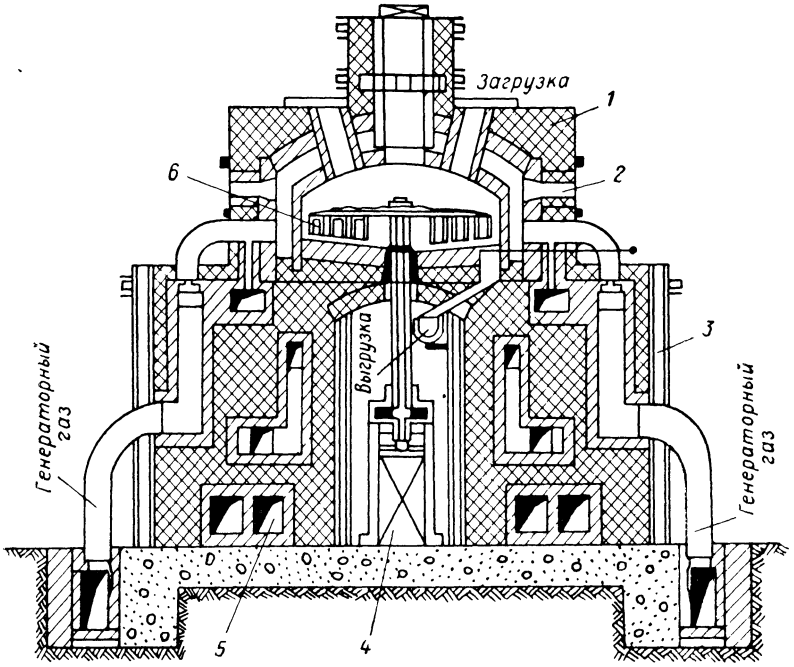


Рис. 42. Печь глетная второго обжига:
1 — футеровка; *2* — глазок; *3* — каркас; *4* — приводной механизм; *5* — дымовые каналы; *6* — мешалка.

на фундаменте под печью. Муфель находится в цилиндрической футеровке печи, заключенной в металлический кожух и каркас. Полый вал и гребки мешалки охлаждаются водой, подаваемой снизу.

Обогрев муфеля печи с продуктами осуществляется дымовыми газами от сжигания мазута или природного газа, поступающими непосредственно в кольцевое пространство между муфелем и футеровкой печи из четырех выносных топок. Отработанные дымовые газы через каналы в футеровке печи покидают подмуфельное пространство и через боров и дымовую трубу выбрасываются в атмосферу.

Глет непрерывно подается через течку и отверстие в куполе муфеля и гребками мешалки равномерно распределяется по поду

муфеля, одновременно перемещаясь от центра к периферии, к разгрузочному отверстию, присоединенному к шнеку с водяной рубашкой.

Процесс окисления глета-сырца до содержания в нем 0,01% ведется при 650—700 °С и длится 1,5—2 ч.

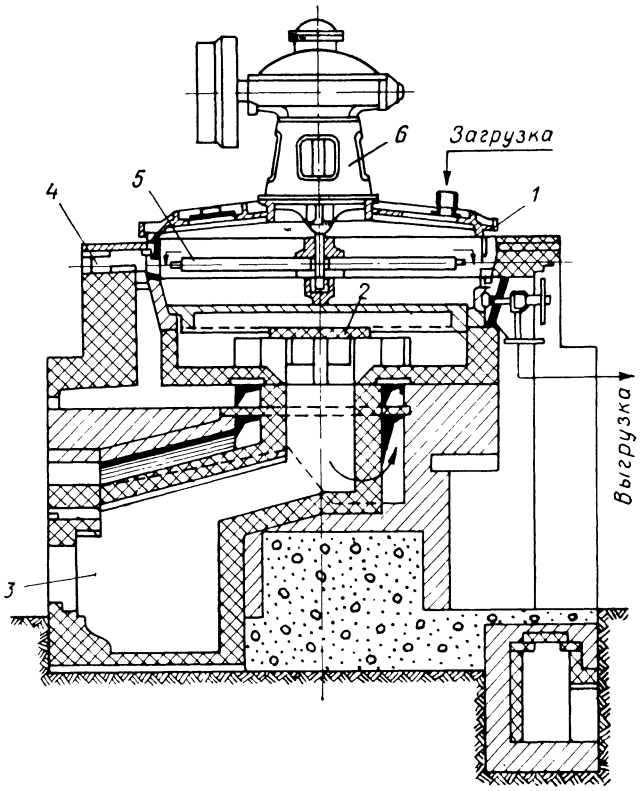


Рис. 43. Печь суриковая периодического действия:
1 — муфель печи; *2* — плита для защиты днища от ударного действия пламени; *3* — топка; *4* — гляделка; *5* — мешалка; *6* — привод.

Печь суриковая периодического действия предназначена для окисления глета-сырца в сурик. Конструкция печи приведена на рис. 43. Печь состоит из чугунного цилиндрического реактора с плоским днищем и крышкой. Внутри реактора находится горизонтальная мешалка с плужками, вертикальный вал которых проходит через крышку и закрепляется к приводному механизму, станина последнего устанавливается на крышке реактора. Мешалка выполнена в виде пятиугольного каркаса, образованного прикрепленными к валу спицами (водилами), соединенными концами для большей жесткости планками. К водилам свободно подвешены

плужки, которые при вращении мешалки скользят по дну реактора и перемешивают материал. К этим же водилам жестко прикреплены направляющие лопатки, которые при вращении вала мешалки в обратную сторону сгребают сурик к периферии. В боковой стенке реактора имеется отверстие для выгрузки готового продукта, подгребаемого направляющими лопатками. Во время работы отверстие закрыто заслонкой.

Реактор помещается в футеровку печи с зазором по бокам, куда поступают дымовые газы из встроенной топки, где происходит сжигание жидкого или газообразного топлива. Топка расположена в нижней части печи. В футеровке печи имеются каналы: центральный — для подвода под днище реактора раскаленных дымовых газов и периферийные — для отвода их и выброса через боров и дымовую трубу.

Для защиты днища реактора от сильного перегрева при непосредственном воздействии на него раскаленных газов в момент выхода их из топки под ним установлена шамотная плита, которая опирается на вертикальные стены печи.

Загрузка печи производится периодически через два отверстия в крышке реактора из бункеров, установленных под ней. Печь имеет диаметр 3,5 м. Одновременно загружается 3—3,5 т глета. Продолжительность процесса образования сурика 19—25 ч при температуре в муфеле 450 °С. Перед загрузкой глета реактор должен иметь температуру не выше 300 °С, во избежание комкования частиц глета и образования на их поверхности слоя сурика, затрудняющего дальнейшее проникновение кислорода воздуха.

Печи производства фиолетовых пигментов. Общие сведения. Ультрамарин — алюмосиликат, содержащий натрий и серу и обладающий специфичной кристаллической решеткой. В качестве исходного алюмосиликата для получения ультрамарина применяют каолин $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$. При прокаливании в присутствии сульфидов натрия, которые образуются в ультрамариновой шихте, каолиновая кристаллическая решетка перестраивается в ультрамариновую. Ультрамарин различают по содержанию в нем натрия.

Многосернистые и многокремневые ультрамарины, получаемые из шихты с отношением Na : S, соответствующим сульфиду натрия $Na_2S_{3,5}$ и отношением $SiO_2 : Al_2O_3$ (2,5—3) по содержанию в натрии можно расположить в ряд $Na_6Al_4Si_6O_{24}$ (синего цвета); $Na_5Al_4Si_6S_4O_{23}$ (фиолетового цвета); $Na_3Al_4Si_6S_4H_3O_{23}$ (красного цвета).

Здесь рассмотрено получение ультрамарина — полупродукта синего цвета. Полуфабрикат является промежуточным продуктом, перерабатываемым далее на ультрамарин-краски и ультрамариновую синьку. Исходным сырьем и материалами для производства ультрамаринового полуфабриката являются: 1) сера по ГОСТу 127—64; 2) сода кальцинированная по ГОСТу 5100—64; 3) пек каменноугольный по ГОСТу 1038—65; 4) каолин по ГОСТу 6138—61; 5) инфузорная земля ТУ МХП 2239—60.

Шихту составляют по основной рецептуре (в масс. %):

	В 100%-ном веществе	В натуре
Сера	31,6	30,4
Сода кальцинированная	31,0	30,3
Каолин	27,9	30,1
Инфузорная земля	5,7	5,6
Каменноугольный пек	3,8	3,6
Всего	100	100

Соотношение $SiO_2 : Al_2O_3$ колеблется от 1,6 до 1,7.

Для обжига шихты применяют печи конструкции Грум-Гржимайло с обращенным пламенем и комплекс вращающихся печей.

Печь системы Грум-Гржимайло. Конструкция печи приведена на рис. 44. Печь состоит из верхней рабочей камеры, предназначенной для установки тиглей с шихтой и проведения обжига, нижней камеры, где производится сжигание природного газа и получение теплоносителя. Дымовые газы по двум каналам, идущим вдоль всей печи, через отверстия поступают непосредственно в рабочую камеру.

Рабочую камеру от камеры сжигания топлива отделяет решетчатый под, представляющий собой систему газоходов для равномерного распределения по всей площади печи дымовых газов и отвода их. Благодаря принятой в печи системы газоотводящих устройств наиболее полно обеспечивается равномерный прогрев всех тиглей и однозначность температуры во всем объеме ее рабочей камеры.

Продукты сгорания топлива через отверстия в сводах камеры горения поднимаются в верхнюю часть рабочей камеры и, охлаждаясь за счет передачи тепла тиглями, медленно опускаются, омывая тигли со всех сторон. Вследствие большого количества отверстий в поду печи и равномерного их размещения поток газов при его опускании движется с одинаковой скоростью по всему сечению печи, заполняя весь ее объем. Далее, пройдя через отверстия в поду, часть газов поступает к отводящему центральному коллектору и затем по борову отводятся в дымовую трубу и выбрасываются в окружающую атмосферу. Другая часть за счет большой скорости выходящего потока продуктов горения из камеры горения инжектируется и, смешиваясь с ними, снижает температуру до требуемой процессом.

Природный газ сжигается в камере горения. Горючая газовоздушная смесь приготовляется в инжекционных горелках, установленных на фронтовой стене печи против камер горения. Горение осуществляется в туннелях горелки и камере горения. Конструкция инжекционной горелки выполнена таким образом, что позволяет герметично закрывать горелку в период режима томления, чтобы не было подсоса воздуха в камеру горения.

Печь футерована красным кирпичом, кроме камеры горения, которая футерована огнеупорным кирпичом. Механическую прочность печи придает сварной металлический каркас из профильного стального проката.

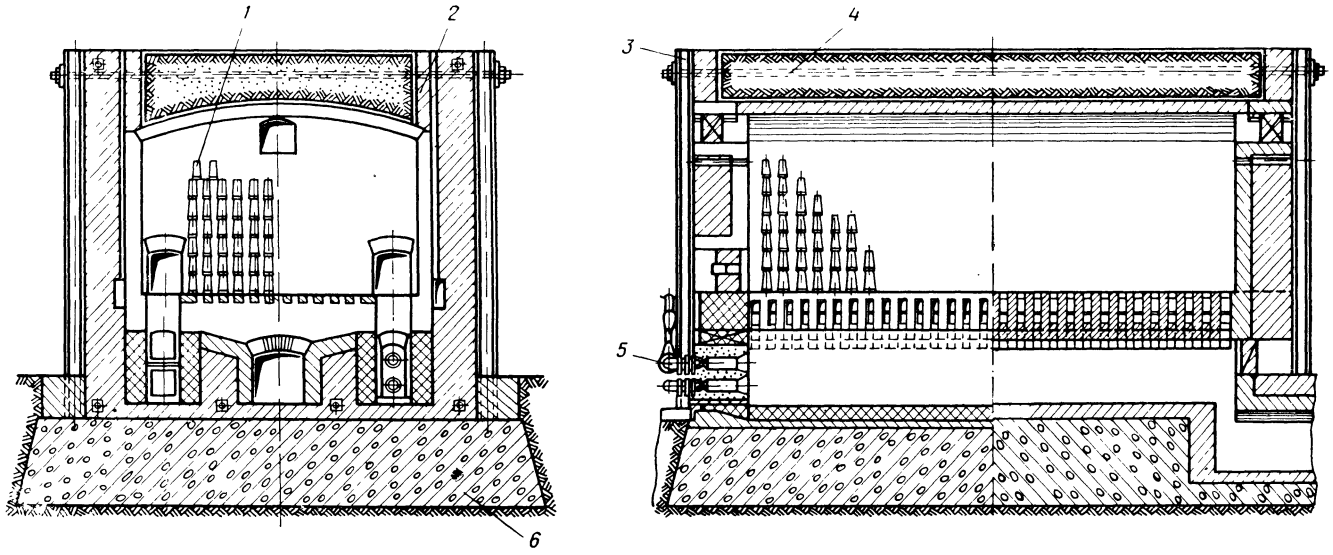


Рис. 44. Печь обжигательная ультрамариновая системы «Грум-Гржимайло»:
1 — тигель; *2* — футеровка; *3* — каркас; *4* — засыпка огнеупорная; *5* — горелка; *6* — фундамент.

Загрузку печи тиглями с шихтой осуществляют через отверстия на фронтовой стенке печи. Отверстия в дальнейшем закладывают кирпичом и обмазывают глиной с песком. Загружаемая в тигли шихта получается смешением всех компонентов. Тигли изготовлены из пористого материала для того, чтобы реакционные газы могли выходить. Кроме того, через поры в тигле проникают газы, например, кислород, который участвует в реакции образования синего ультрамарина. Тигли имеют форму усеченного конуса с глухим днищем и съемной крышкой. Наружные размеры тиглей следующие: высота 335—340 мм; диаметр верхний 254—257 мм; диаметр нижний 200—202 мм; толщина стенок 15 мм; масса тигля 5,2—5,5 кг. Крышки имеют следующие размеры: диаметр 250—256 мм; толщина 22—25 мм; масса тигля 1,9—2,0 кг. Газопроницаемость тиглей должна быть 17—33 с. В тигель вмещается около 6,5 кг шихты. Всего в описываемую печь устанавливают 1100 тиглей.

Шихта, насыпанная в тигель, уплотняется обжимной ручкой с целью создания тесного соприкосновения частиц, а следовательно, и для благоприятных условий реакции между составными частями шихты и менее благоприятных условий для испарения ее и окисления.

Основное количество тиглей в печь устанавливается без крышек «двойниками», для чего один тигель с шихтой опрокидывается на другой, а щели между ними обмазывают глиной с песком. Тигли устанавливают на под печи столбами. В каждом столбе по три двойника (6 тиглей). При установке седьмого тигля на столб и после заполнения его шихтой тигль закрывают керамической крышкой, а образующуюся щель обмазывают глиной и песком. От качества установки тиглей зависит и качество полуфабриката. Тигли должны быть установлены на под печи над газоходами так, чтобы было обеспечено равномерное омывание их топочными газами.

Обжиг шихты. При обжиге шихты происходит образование ультрамарина. Этот процесс можно разделить на два этапа: на образование зеленого ультрамарина и на окисление его в синий.

Процесс образования зеленого ультрамарина заключается в соединении алюмосиликатного ядра с натрием и серой. Взаимодействие начинается при низких температурах и завершается при выдерживании массы при 700 °С.

В окружающей алюмосиликаты массе происходят следующие процессы:

а) при прогревании до 400—500 °С наличная сода реагирует с серой с образованием Na_2S_2, $Na_2S_2O_3$, CO_2. Частично сера в $Na_2S_2O_3$ восстанавливается до Na_2S_2;

б) при прогревании от 400 до 700 °С и восстановлении углеродом серы в пеке $Na_2S_2O_3$ до Na_2S_2 и здесь же происходит удаление кристаллической воды из каолина;

в) происходит обеднение массы серой за счет ее угара (образуются SO_2, H_2S) и возгонки.

Для уменьшения угара доступ кислорода в эти периоды ограничен до минимума. При этом находящиеся в массе соли окисляются

до Na_2SO_4 и количество натрия и серы в ультрамарине незначительно уменьшается. По-видимому, установившиеся при этих условиях связи между ионами натрия и серы в кристаллической решетке ультрамарина определяют образование синего цвета.

В процессе обжига угар серы достигает 70%, общий угар массы колеблется около 40%. Практически процесс ведения обжига делится на шесть периодов.

Задачей проведения I периода является поднятие температуры в печи до 500 °С равномерно по объему печи при наименьшей величине угара серы. Во II периоде проводится равномерное обогревание

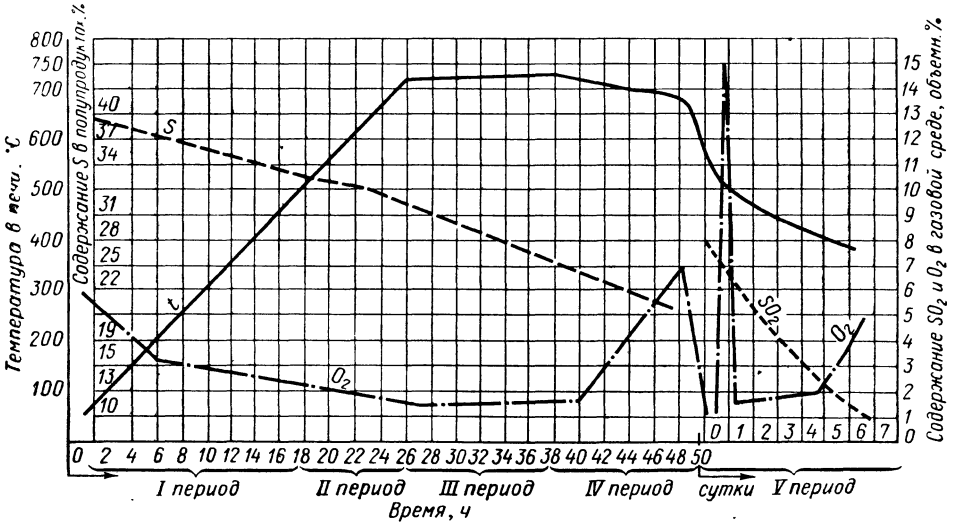


Рис. 45. График режимов обжига шихты в производстве ультрамарина в камерной печи.

тиглей с шихтой при наименьшем угаре серы. Во время III периода проводится выдержка температуры до получения зеленого ультрамарина. В течение IV периода происходит окисление шихты в условиях окислительной газовой среды и охлаждения печи до 600 °С. После IV периода печь закрывают и тщательно обмазывают глиной все щели. Во время V периода осуществляется томление — окисление зеленого ультрамарина в синий при постепенном охлаждении печи до температуры не меньше 360 °С. Во время VI периода происходит охлаждение печи до 45 °С. Режимы обжига шихты в печи показаны на рис. 45.

Печи с вращающимися барабанами для производства ультрамарина-полуфабриката не имеют недостатков, присущих печам Грум-Гржимайло.

В этих печах технологический процесс проводится раздельно следующим образом: обжиг шихты для получения зеленого ультрамарина проводится в муфеле вращающейся печи, а его окисление

в синий происходит в металлическом барабане вращающейся печи с наружным обогревом.

Печь с вращающимся барабаном (*ПМВУ-1*) предназначена для обжига шихты с целью получения полуфабриката зеленого ультрамарина. На рис. 46 приведена конструкция печи. Она состоит из следующих основных узлов: цилиндрического барабана; механизма загрузки печи; камеры для отвода дымовых газов; камер для подачи теплоносителя; топок; камеры разгрузочной; опорно-упорных устройств; механизма привода.

Реакционной камерой, где осуществляется обжиг шихты, является цилиндрический барабан с наружным диаметром 2500 мм, выполненный сварным из стального листа толщиной 22 мм. В конце барабан сужается до диаметра 1460 мм с толщиной 28 мм. Общая длина барабана 48 м. На конце барабана имеется внутренний выступ 50 мм, который предотвращает горизонтальное смещение футеровки в сторону разгрузки. Барабан устанавливается с уклоном 64 : 1000 в сторону разгрузки. Для того чтобы обжиг шихты происходил без контакта с теплоносителем и чтобы барабан не коробился под действием высоких температур внутри, он имеет специальную футеровку из фасонных огнеупорных блоков.

Внутренний муфель, в котором происходит обжиг и перемещение шихты, образуется из 12 карборундовых блоков, имеющих трапециевидную форму с внутренними дымовыми каналами такой же формы. Наружная стенка карборундовых блоков перекрывается 12 сплошными трапециевидными блоками из шамота-легковеса с удельной массой 1300 кг/м^3. В промежутке между этими блоками устанавливаются шамотные замковые блоки. Огнеупорная футеровка укладывается на асбестовые листы толщиной 10 мм, выполняющих роль тепловой изоляции барабана.

Конец барабана футеруют шамотом-легковесом толщиной 113 мм на асбестовом листе толщиной 6 мм.

Для ликвидации скольжения футеровки по барабану к нему приварены 6 выступов, которые входят в пазы блоков из шамота-легковеса. Шамотные блоки имеют треугольный выступ, входящий в паз, образованный карборундовыми плитами, и предотвращает скольжение муфельной футеровки по наружной.

Загрузка печи осуществляется шнековым питателем, установленным на отдельной опорной раме, входящей внутрь барабана через торцевую футеровку и стальной лист, скрепленный с барабаном.

В начале барабана установлена камера для отвода дымовых газов, имеющих температуру 700 °С, из дымовых туннелей в футеровке. В начале печи в 6 карборундовых блоках и 6 блоках, изготовленных из шамота-легковеса, и корпусе барабана имеются отверстия для вывода отработанных дымовых газов. Камера имеет цилиндро-коническую форму, выполненную разъемной. Камера сварная из стального листа толщиной 10 мм и футерована кирпичами из шамота-легковеса. Дымовые газы удаляются через нижнюю коническую часть камеры. На верху камеры установлен взрывной клапан

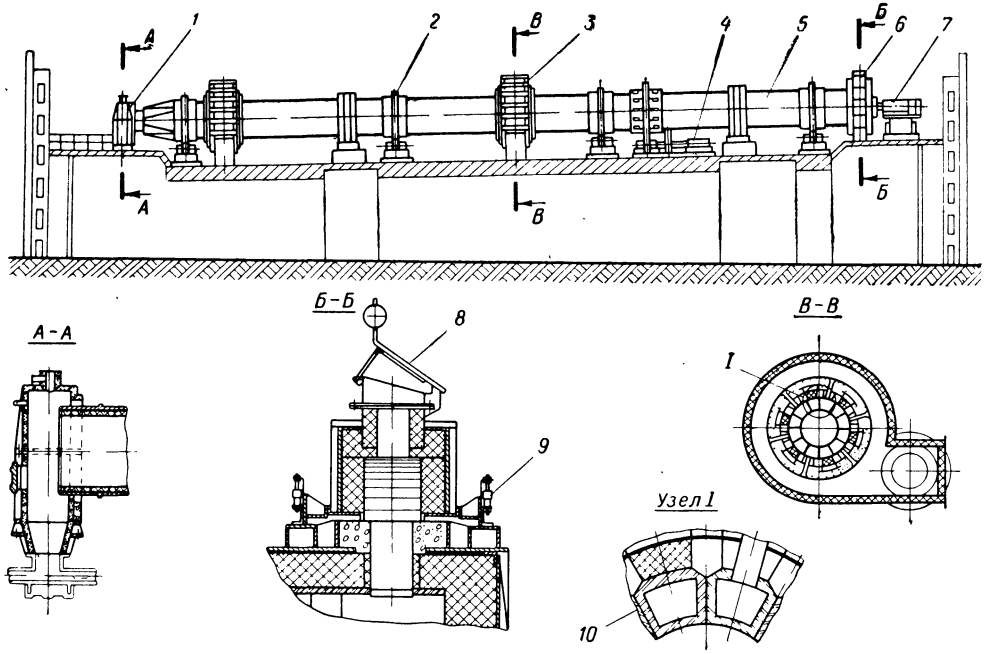


Рис. 46. Печь с вращающимся барабаном для обжига шихты ультрамарина (ПМВУ-1):

1 — разгрузочная камера; *2* — опорно-упорные станции; *3* — камера для подачи теплоносителя; *4* — механизм привода; *5* — барабан; *6* — камера для отвода дымовых газов; *7* — механизм загрузки; *8* — взрывной клапан; *9* — уплотнение барабана; *10* — фасонные камни муфеля.

для предохранения оборудования и обслуживающий персонал от взрыва.

Конструкция выполнена таким образом, что в случае взрыва смеси прорывается асбестовый лист и отходит металлический лист конструкции резервного клапана. При отходе металлического листа откидывается поддерживающий упор за счет контргруза. Отверстие закрывается резервным откидным металлическим клапаном без нарушения хода технологического процесса.

Корпус барабана на участке отвода дымовых газов теплоизолирован огнеупорным бетоном. В кольце из огнеупорного бетона имеются отверстия для охлаждения воздухом наружной поверхности барабана. Камера оборудована уплотнениями для обеспечения герметичности печи.

Теплоноситель для проведения процесса обжига приготавливается в двух отдельностоящих цилиндрических циклонных топках. В качестве топлива используется природный газ. Расход природного газа в топке составляет 204 м³/ч. Теплоноситель выходит из топки с температурой 1000 °С. Подробное описание конструкции топки приведено на стр. 268.

Теплоноситель из топки поступает тангенциально снизу в камеру для подачи его в дымовые каналы муфелей, откуда тепло передается через стенку шихте. Подвод тепла в печь осуществляется через две камеры, установленные в начале и середине барабана с муфелями. Подвод теплоносителя в двух местах вызван необходимостью поддерживания равномерной температуры в реакционной камере (815 °С). Температура теплоносителя в дымовых каналах равна 900 °С.

Камера имеет цилиндрическую форму с внутренним диаметром 4292 мм, футерована кирпичом из шамота-легковеса, теплоизолирована асбестовым листом толщиной 12 мм и заключена в сварной металлический корпус из 12-миллиметровой стали.

На корпус барабана вертикально приварены ограничительные стальные листы толщиной 10 мм и на нем же приварены Z-образные крючки из круглого проката и обмазаны огнеупорным бетоном толщиной 350 мм. Теплоноситель в дымовые каналы муфеля вводится через отверстия в блоках из шамота и карборунда. Размер отверстия 210 × 220 мм.

В кольце из огнеупорного бетона, облегающем барабан, имеются туннели для принудительной подачи воздуха, охлаждающего корпус барабана. Камеры с обеих сторон имеют уплотнительные устройства для обеспечения герметичности печи.

Разгрузку зеленого ультрамарина производят через конец барабана в разгрузочную камеру, выполненную из сварного стального листа толщиной 12 мм. Камера разъемная и имеет цилиндро-коническую форму. На внутренней поверхности кожуха приварены в шахматном порядке Z-образные крючки. На эту поверхность наносят огнеупорный бетон толщиной 75 мм для предохранения кожуха от действия высоких температур. На верхней части камеры приварен патрубок с фланцем для отвода газов из реакционного про-

странства печи. Объем реакционных газов, удаляемых из печи, равен 109 м³/ч.

Нижняя часть камеры заканчивается фланцем для присоединения патрубка от вращающейся окислительной печи.

К корпусу кожуха приварены опоры, при помощи которых камера устанавливается и крепится к перекрытию цеха. Со стороны входа барабана в камеру установлены уплотнительные устройства, которые крепятся к фланцам камеры. В корпусе камеры предусмотрены отверстия для взятия пробы ультрамарина, отходящих реакционных газов и установки термопар.

Барабан покоится на опорно-упорных станциях, установленных и закрепленных на железобетонные фундаменты. Вращение барабана осуществляется приводным механизмом, имеющим следующие угловые скорости (об/мин):

Рабочая	0,167
Минимальная	0,079
Максимальная	0,354

Мощность электропривода 7,5 кВт.

Время пребывания материала в печи 17 ч. В реакционном пространстве для исключения подсоса газов поддерживается давление 10 Па.

Печь с вращающимся барабаном для окисления зеленого ультрамарина в синий (*ПОУ-1*) имеет наружный обогрев и ее конструкция подобна печи для получения плавиковой кислоты. Диаметр барабана 1600 мм, длина его 18 500 мм, обогреваемая длина барабана равна 13 224 мм. Загрузка производится шнеком. Барабан установлен с уклоном 16 : 1000. В нагревательной камере сжигается природный газ. Производительность по готовому полуфабрикату 400 кг/ч. Время пребывания материала в печи 12 ч. Температура материала на входе в печь равна 400 °С, на выходе 250 °С.

Угловая скорость барабана (об/мин):

Рабочая	4
Минимальная	1,17
Максимальная	5,3

Мощность электродвигателя привода 13 кВт.

Печи производства черных пигментов. Общие сведения. Печные сажи, являющиеся черными углеродсодержащими пигментами, получаются в печах при разложении углеводородов под воздействием высокой температуры. Необходимое для разложения сырья тепло создают за счет сжигания газообразного или жидкого топлива или части самого сырья. Более прогрессивными конструкциями печей считают такие, в которых для получения используется постороннее горючее.

От конструкции печей и режима сжигания горючего и сырья зависит свойство получаемой сажи. Сырьем для получения сажи служит: *зеленое масло* (керосино-газойлевая фракция 190—360 °С, продукт пиролиза крекинг-керосина); *коксовый дистиллят* (остаточная фракция продуктов коксования нефтяных остатков); *термогазойль* (газойлевая фракция 200—460 °С термического крекинга,

газойлит каталитического крекинга и фенольных экстрактов масляных дистилляторов); *тяжелый каталитический газойль* (остаточная фракция продуктов каталитического крекинга, газойля прямой гонки и др.); *антраценовая фракция и антраценовое масло* (продукты переработки каменноугольной смолы).

При сжигании горючего в камере создаются вращающиеся потоки пламени. В эти потоки впрыскивается нагретое и распыленное в форсунке сырье. Потоки горящего топлива и паров сырья смешиваются и переходят в реакционную камеру. В результате интенсивного турбулентного движения газов в этой камере (55—65 м/с) происходит разложение сырья и образование сажи. Процесс протекает быстро

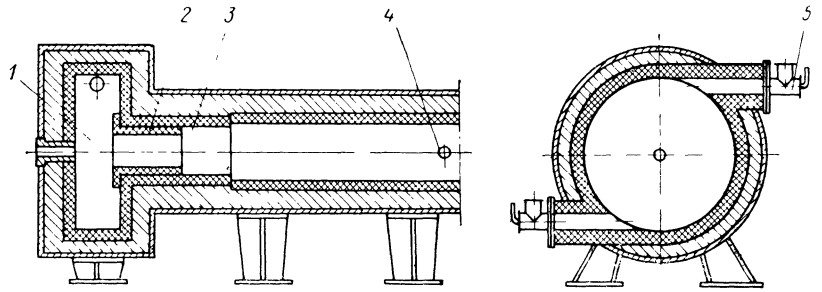


Рис. 47. Печь циклонная для получения сажи без применения постороннего топлива:
1 — камера горения; *2* — суживающая втулка; *3* — камера реакции; *4* — канал для водяной форсунки; *5* — горелка.

(0,05—0,06 с). Чтобы его прекратить, в реакционную камеру впрыскивают воду с помощью форсунок, установленных в каналах зоны охлаждения печи. Испарение воды в этой зоне понижает температуру саже-газовой смеси до 750—800 °С. Охлажденная саже-газовая смесь через выходной патрубок удаляется из печи для охлаждения и выделения из нее сажи.

Печи без применения постороннего топлива. На рис. 47 представлена конструкция цилиндрической горизонтальной печи. Печь состоит из реакционной камеры, в которой происходит горение сырья. Реакционная камера имеет цилиндрическую форму, соединенную конусным переходом с цилиндрическим боровом. Печь футерована огнеупорным кирпичом и теплоизолирована диатомовым кирпичом и заключена в сварной металлический кожух из листовой стали. Форсунку для распыливания сырья устанавливают в передней части печи. Конструкции форсунок рассмотрены далее. В реакторе образуются турбулентные потоки горящего сырья, в которых образуется сажа. Степень дисперсности сажи регулируют изменением расхода воздуха, подаваемого в форсунку. С увеличением расхода воздуха большая часть сырья сгорает, при этом повышается температура процесса и дисперсность получаемой сажи.

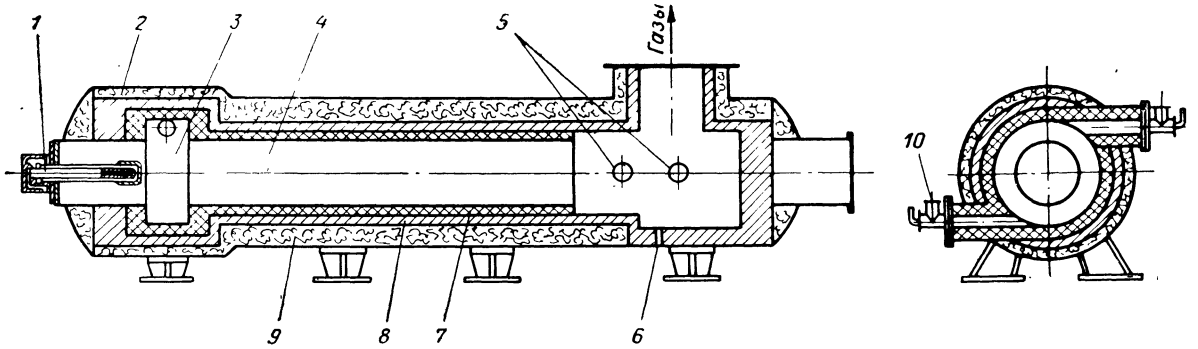


Рис. 48. Печь циклонная для получения сажи с применением постороннего топлива:

1 — форсунка для сырья; *2* — корпус; *3* — камера горения; *4* — камера реакции; *5* — каналы для водяных форсунок; *6* — патрубок для стока неиспарившейся воды; *7* — футеровка; *8* — футеровка шамотным кирпичом; *9* — футеровка теплоизоляционным кирпичом; *10* — горелка.

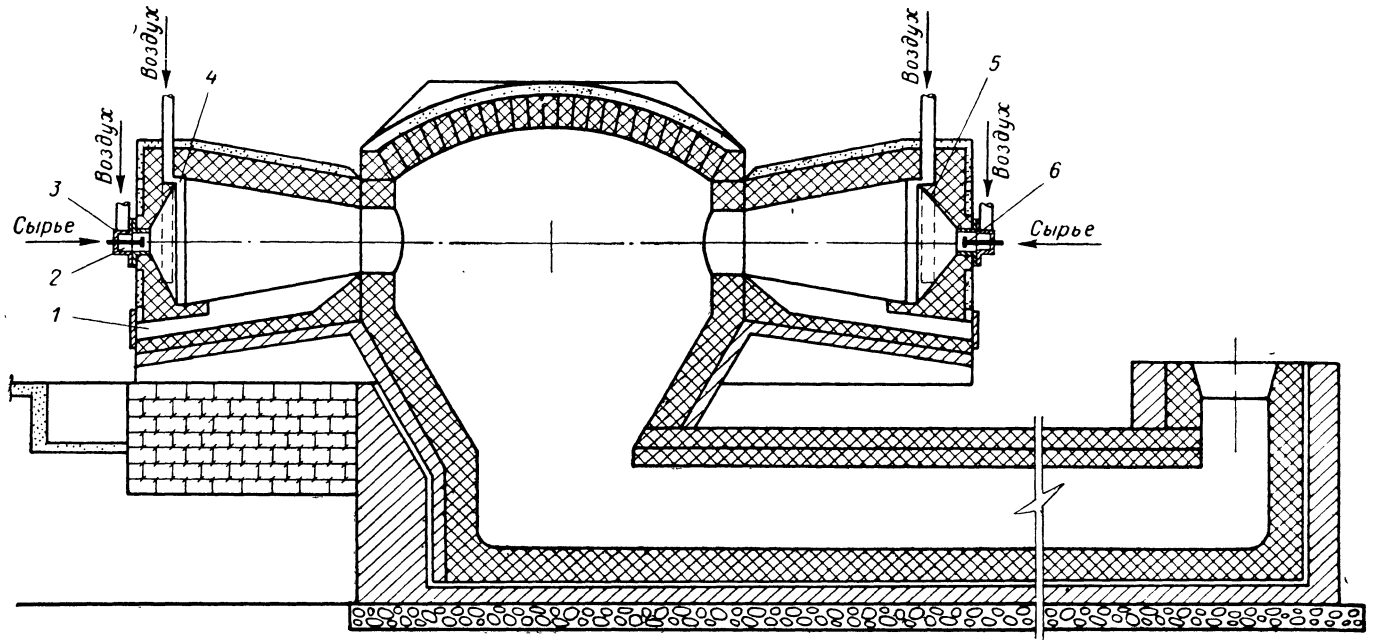


Рис. 49. Печь коническая для получения сажи (форсуночная):

1 — канал для удаления нагара; *2* — штуцер для подачи воздуха; *3* — горелочное устройство; *4* — щель для ввода воздуха из подковообразного канала; *5* — подковообразный поддувальный канал; *6* — форсунка.

Диаметр цилиндрической части реакционной камеры 1 м, длина 2,8 м. Диаметр борова 0,6 м. Скорость движения саже-газовой смеси в реакционной камере 7—9 м/с. Время пребывания в реакционной камере 0,3—0,4 с. Сажа получается марки ПМ-75. В борове скорость саже-газовой смеси возрастает до 30 м/с. Производительность печи по саже 140—220 кг/ч при расходе сырья 500—700 кг/ч высокотемпературного коксования каменных углей. Пековые дистилляты (продукты, получаемые при окислении каменноугольного пека и его коксования), применяемые в производстве сажи печи, можно разделить на следующие виды: печи с использованием постороннего топлива и печи без применения постороннего топлива.

Печи с применением постороннего топлива. На рис. 48 представлена конструкция циклонной печи для получения сажи из жидкого сырья.

Печь состоит из двух камер: камеры горения постороннего топлива и реакционной камеры. Футеровка печи выполнена из огнеупорного шамотного кирпича и теплоизоляционного диатомового кирпича. Внутренний диаметр камеры горения примерно в 3 раза больше внутреннего диаметра реакционной камеры. Длина камеры горения значительно короче длины реакционной камеры. В камере горения в двух точках по касательной и образующей поверхности цилиндра имеются каналы, в которые вставляются горелки для подготовки горючей газовоздушной смеси, а сжигание производится в камере горения.

На рис. 49 представлена коническая печь для получения сажи из жидкого сырья (печь форсуночная).

Печь состоит из нескольких камер горения, расположенных вокруг конического коллектора, в которых осуществляется сжигание сырья, распыленного в форсунках. Сажа и газообразные продукты от отдельных топок поступают в сборный коллектор печи и далее по борову направляются в систему охлаждения саже-газовой смеси и отделения из нее сажи.

Камера горения представляет собой сочетание двух усеченных конусов и цилиндра между ними, имеющих общую горизонтальную ось. Форсунка для ввода сырья расположена по оси камеры горения в передней ее части. В нижней части камеры горения имеется канал прямоугольного сечения с дверкой. Этот канал предназначен для удаления кокса и нагара, образующихся при горении сырья. Через этот канал может быть подан дополнительный воздух. Изменяя количество воздуха, подаваемого в различные части камеры горения, можно изменять свойства сажи.

Печи производства светящихся составов

Общие сведения. Печи в производстве светящихся составов (люминофоров) применяются для прокаливания шихты. Температура во время прокаливания различна и зависит от марки люминофора (900—1250 °С). Прокаливание ведут при постоянной температуре с интервалом 10—15 °С. Регулирование температуры в печи производится автоматическими регуляторами.

Для каждого вида сульфидных люминофоров выбирается специальный тип печи.

В производстве люминофоров применяют только электрические печи сопротивления, которые по конструктивным особенностям могут быть разделены на три типа: камерные, муфельные (трубчатые) и туннельные.

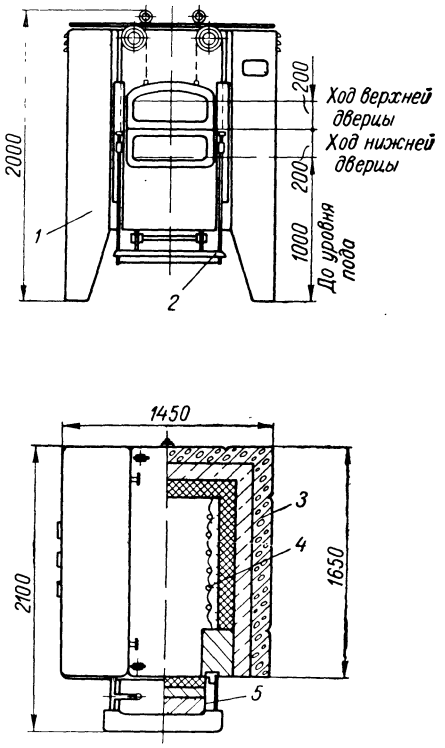


Рис. 50. Печь камерная электрическая для прокаливания люминофоров типа ОКБ-210А:

1 — кожух; *2* — механизм открывания дверец; *3* — футеровка; *4* — нагревательные элементы; *5* — дверца.

Печи камерные. Шихту при прокаливании в камерной печи помещают в кварцевый тигель или кювету. В качестве камерной печи применяют высокотемпературную электропечь типа ОКБ-210А (рис. 50). Печь имеет сварной кожух, футерованный огнеупорным и теплоизоляционными материалами. Кожух выполнен из листовой и профильной стали. К его передней стенке крепится на болтах литая чугунная гарнитура. Огнеупорная часть футеровки печи выполнена из шамотного кирпича и из шамота-легковеса. Теплоизоляция выполняется из ультралегковесного и диатомового кирпича. Боковые стенки камеры нагрева выложены специальным фасонным кирпичом из высокоглиноземистого шамота. В пазах кирпичей установлены нагревательные элементы, выполненные или в виде целых стержней с утолщенными выводными концами, или в виде трех карборундовых частей, расположенных вертикально по 6 вдоль каждой боковой стенки. Составные стержни зажимаются специальными прижимами.

Нагревательные элементы питаются электроэнергией через понижающий автотрансформатор, который имеет несколько ступеней напряжения, необходимых для изменения напряжения, т. е. уменьшения их омического сопротивления.

На поду печи уложены плиты из карборунда, на которые помещены тигли или кюветы с шихтой.

Оконный проем электропечи перекрывается футерованной дверцей, выполненной из двух частей. Дверцы открываются педальным механизмом. При нажатии педали одна половина дверцы поднимается вверх, а вторая — опускается вниз.

Температура в печи контролируется автоматическим самопишущим потенциометром посредством платино-платинородиевой термопары, установленной в рабочем пространстве камеры нагревания.

Техническая характеристика печи:

Мощность печи	50 кВт
Максимальная рабочая температура	1300 °С
Напряжение на нагревателях	65—81 В
Количество фаз	3
Напряжение питающей сети	380/220 В
Мощность холостого хода	20 кВт
Размеры рабочего пространства:	
ширина	520 мм
длина	945 »
высота	350 »
Габаритные размеры печи	
ширина	1450 мм
длина	2100 »
высота	2000 »
Общая масса печи	3,6 т

Печи муфельные (трубчатые). Для прокаливания некоторых видов сульфидных люминофоров применяются муфельные (трубчатые) электропечи (рис. 51). Шихту, подвергаемую прокаливанию, помещают в кварцевую трубу с наружным диаметром 150 мм и длиной 1300—1350 мм. Кварцевая труба устанавливается в печь вертикально. Печь предварительно нагревается до 400—500 °С и в нагретую печь загружают шихту в несколько приемов, после чего температуру печи доводят равномерно до 1250 °С. После прокалки шихты температура равномерно снижается до 400 °С и кварцевая труба удаляется из печи.

Некоторые составы сульфидных люминофоров разгружают из печи при температуре прокаливания. В трубчатую печь за одну операцию помещают 10 кг шихты.

Печь во время работы может поворачиваться и для этого снабжена ручным механизмом. Футеровка печи выполнена в два слоя: первый (внутренний) — из шамотного кирпича класса А, второй — из шамота-легковеса БЛ-0,4. Между металлическим кожухом и футеровкой проложен для теплоизоляции асбестовый лист толщиной 5 мм.

Техническая характеристика печи:

Производительность	30 кг/сутки
Мощность печи	24 кВт
Максимальная рабочая температура	1250 °С
Напряжение на нагревателях	84 В
Количество фаз	3
Количество нагревателей	12
Мощность нагревателя	2 кВт
Тип нагревателя	Силитовые стержни
Давление в печи	Атмосферное

Печи туннельные. Для непрерывного прокаливания шихты применяют электропечь сопротивления (рис. 52).

Электропечь ЦЭП-357А выполнена с одним механическим толкателем. Шихту, прокаливаемую в кварцевых тиглях или кюветах, устанавливают на тележку. Со стороны загрузки имеется рама,

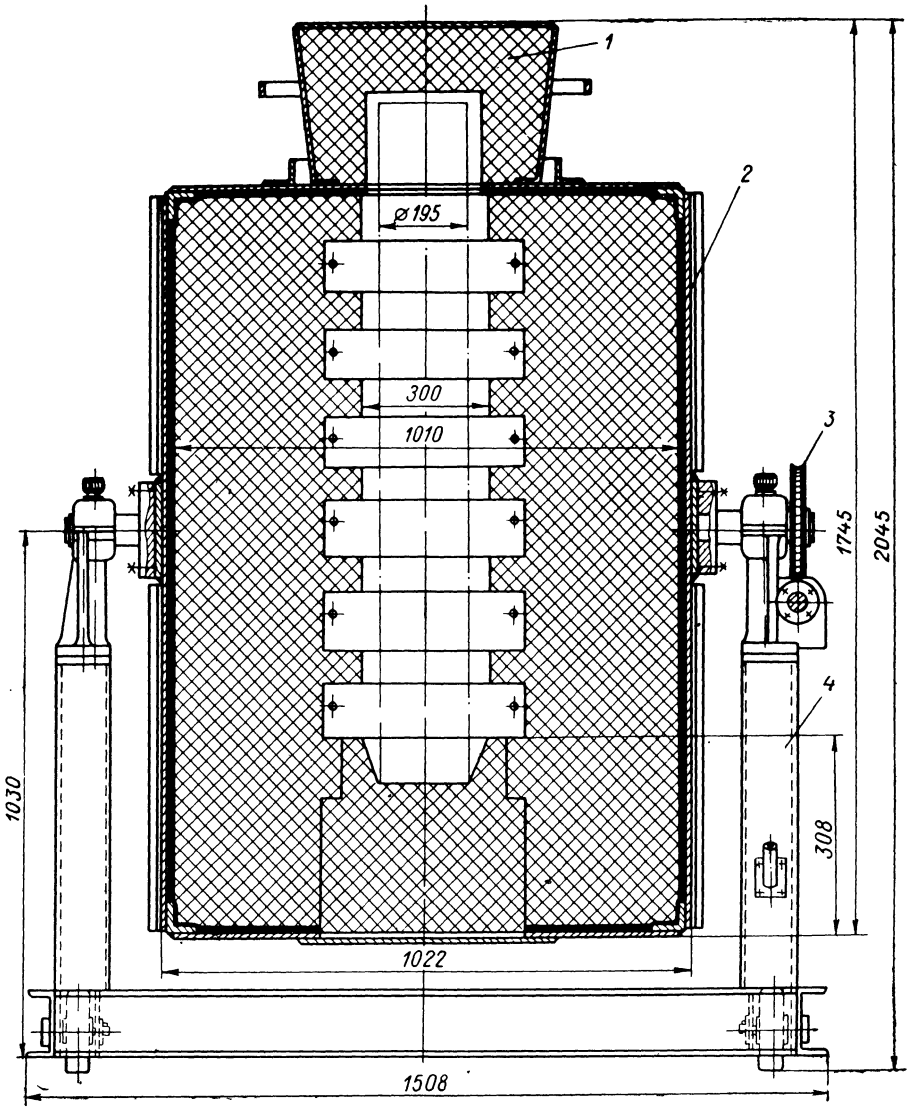


Рис. 51. Печь муфельная (трубчатая) для прокаливания люминофоров:
1 — крышка; *2* — футеровка; *3* — механизм поворота; *4* — стойка с лотками.

по которой продвигается большая тележка, имеющая рельсы, а по ним вкатываются малые тележки. Рельсовые пути находятся по обеим сторонам боковых стенок электропечи. Большая тележка с установленной на ней малой тележкой перемещается по раме

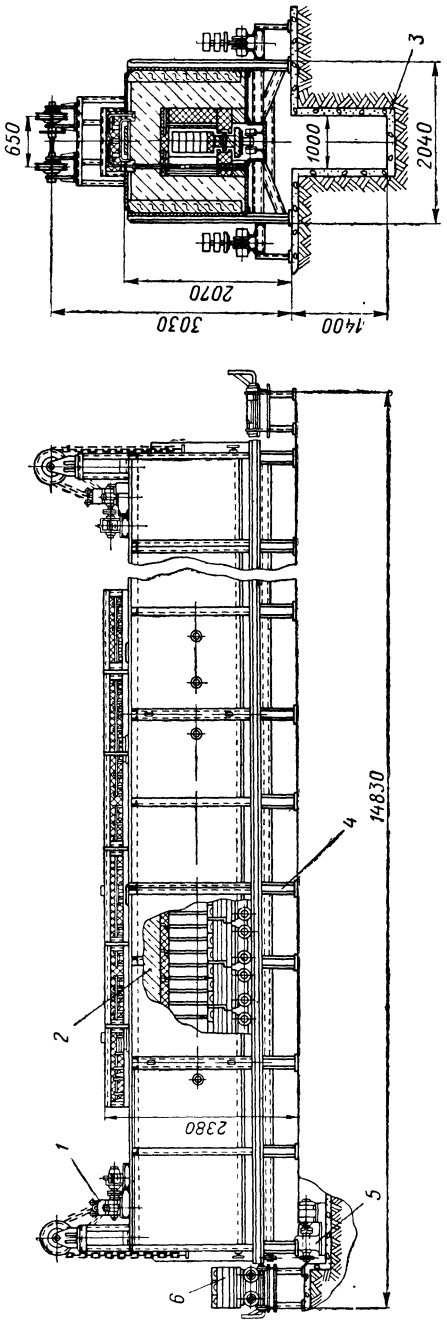


Рис. 52. Печь туннельная электрическая типа ЦЭП-357А:

1 — механизм для подъема двери; *2* — футеровка; *3* — фундамент; *4* — каркас; *5* — механизм для передвижения тележки; *6* — малая тележка.

вручную. Необходимые установки осуществляются с помощью трех фиксаторов на рельсовом пути рамы. Вдоль всей печи с двух сторон имеются рельсовые пути возврата тележки.

Передвижение тележки в печи осуществляется механизмом передвижения, который толкает поезд тележек на длину одной тележки. Таким образом, передвигаются все тележки, и тележка, стоящая на выходе из печи, выталкивается на одну большую тележку. Выходящую тележку разгружают и снова возвращают к месту загрузки вручную по рельсам.

Электродвигатель механизма передвижения тележек может быть включен только при полностью открытой заслонке на стороне загрузки. При возврате толкателя заслонка может начать опускаться. Подъем заслонок механизирован.

Электропечь работает непрерывно. Каркас печи выполняется из листового и профильного проката и состоит из четырех секций, которые между собой соединяются болтами. Печь по длине футерована различно в зависимости от температуры зоны. В первой зоне, т. е. в той части печи со стороны загрузки, где нет нагревателей, огнеупорный слой выполнен из шамота-легковеса, в остальных зонах из шамота.

Теплоизоляционный слой во всех зонах нагревания выполнен из шамота-ультралегковеса и минеральной ваты. В зоне охлаждения огнеупорный слой выполнен из шамота-легковеса, теплоизоляция — из диатомита. Свод печи делается двухслойным из плит шамота-легковеса и ультралегковеса.

Проем электропечи снизу закрывается проходящими через печь футерованными тележками. Тележки передвигаются по рельсам, проложенным через всю печь. Благодаря хорошей футеровке тележек рельсы в печи и ходовые части тележек не нагреваются.

С целью уменьшения тепловых потерь из печи, а также уменьшения перепада температур по высоте, весь проем под тележками перекрыт листами с асбестовым уплотнением. Для обеспечения легкого хода тележек в условиях высоких температур оси колес установлены в подшипниках скольжения на графитовых втулках.

Для отвода газов, образующихся при прокаливании шихты, в верхней и боковой частях футеровки имеются отверстия и каналы. Для дополнительного охлаждения футеровки в зоне охлаждения предусмотрены каналы с отверстиями в поде печи. При помощи имеющихся шиберов можно регулировать температуру охлаждения.

В качестве нагревателей применяются селитовые нагревательные стержни. Стержни имеют утолщенные концы диаметром 28 мм; среднюю часть диаметром 16 мм и рабочую длину 600 мм. Для равномерного прогревания прокаливаемого материала селитовые нагревательные стержни имеют рабочую часть большей длины, чем размер по высоте рабочей части печи. Нагреватели размещены в параболических нишах вертикально на обеих боковых стенках. Благодаря такому размещению стержней обеспечивается хорошее отражение тепловых лучей на обжигаемый материал. Кроме того, стержни защищены от обваливающегося обжигаемого материала.

Мощность печи составляет 120 кВт и размещена в четырех электрических зонах (20, 30, 30, 40 кВт). Каждая зона имеет 12 селитовых стержней, соединенных по 4. Нагреватели всех зон соединены в треугольник. Каждая зона присоединена к трансформатору. С помощью трансформатора мощность нагревания стержней может регулироваться соответственно нуждам производства.

Техническая характеристика электропечи ЦЭП-357А:

Производительность	540 кг/сутки
Максимальная мощность электропечи	120 кВт
Напряжение питающей сети	380 В
Напряжение на нагревателях	93,5—202 В
Количество фаз	3
Количество электрических зон	4
Количество тепловых зон	5
Соединение нагревателей	△
Мощность холостого хода	10,38 кВт
Максимальная рабочая температура	1350 °С
Среда	Воздух
Размеры рабочего пространства (в мм):	
ширина	320
длина	13 500
высота	510
Общая масса электропечи	27 200 кг

Печи для обжига известняка

Общие сведения. Обжиг карбонатного сырья (известняк или мел) производится для удаления CO_2 и получения жженой извести:

$$CaCO_3 \rightleftarrows CaO + CO_2 \mp 1780 \text{ кДж}$$

Температуру диссоциации $CaCO_3$ принято считать равной 898 °С. При этой температуре парциальное давление CO_2 в равновесной системе равно 101 Па. При более низких температурах значительные выходы CaO и CO_2 достигаются только при достаточном разрежении. Температура в зоне обжига 1100—1250 °С, так как для полного разложения необходимо прогреть весь кусок известняка для того, чтобы в середине его не оставалось необожженой извести. Зависимость продолжительности обжига известняка от величины кусков и температуры приведена на рис. 53.

Топливом для известковообжигательных печей служит кокс, антрацит, природный газ и печной газ от герметичных карбидных печей.

Обожженная известь в химической промышленности применяется в производстве карбида кальция, кальцинированной соды.

Технологическое назначение шахтных печей в содовом производстве несколько иное, чем в производстве карбида кальция. Различие заключается в том, что в содовом производстве отходящие дымовые газы CO_2 являются основным продуктом, необходимым для карбонизации аммонизированного рассола, а известь используется для регенерации аммиака, полученного из растворов хлорида аммония. Это вызвано тем, что CO_2, полученную в таких печах,

используют в качестве сырья в дальнейшем технологическом процессе. От качества карбонатного сырья в значительной мере зависит качество полученных материалов (табл. 25).

Расход карбонатного сырья на 1 т соды составляет примерно 2000 кг, а на 1 т карбида кальция 910—950 кг.

Известняк или мел загружают в печь в виде куска размером от 40 до 120 мм. От размера куска и температуры зависит скорость разложения $CaCO_3$; эти зависимости приведены на рис. 54.

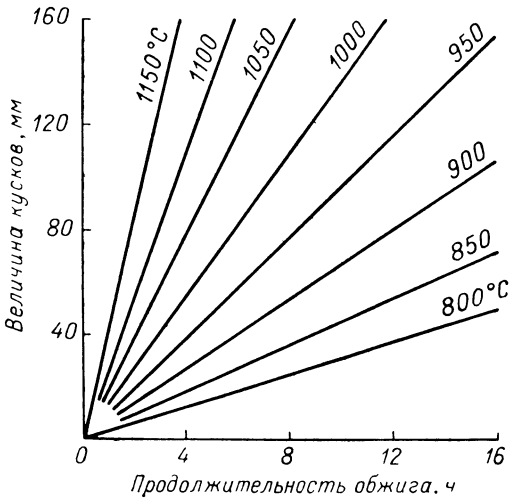


Рис. 53. Зависимость продолжительности обжига известняка от величины кусков и температуры.

Качество получаемой извести зависит также от равномерности измельчения карбонатного сырья, поступающего в печь, так как мелкие куски $CaCO_3$ требуют для обжига меньше времени, чем крупные и при длительном обжиге могут давать так называемый «перекал» или «намертво» обожженную, медленно гасящуюся известь. Содержащиеся в меле и известняке примеси SiO_2 и полуторных окислов ($Fe_2O_3 + Al_2O_3$) способствуют шлакообразованию в печи, отрицательно влияют на процесс обжига и качество получаемой извести.

Технологическое топливо. В качестве твердого технологического топлива используется кокс или антрацит (табл. 26).

Влажность топлива зависит от условий хранения и выпадения атмосферных осадков. Топливо должно быть в виде куска с размерами от 30 до 80 мм.

Таблица 25

Примерный состав мела и известняка (в %)

	Мел		Известняк	
	влажный	сухой	влажный	сухой
$CaCO_3$	79,7	98,00	95,0	95,75
$MgCO_3$	0,5	0,62	2,0	2,02
$CaSO_4$	0,1	0,13	0,5	0,51
SiO_2	0,8	1,00	1,0	1,01
$Fe_2O_3 + Al_2O_3$	0,2	0.25	0,7	0,71
H_2O	18,7	—	0,8	—

Для обжига известняка применяют шахтные печи следующих типов: 1) печи пересыпные на твердом топливе; 2) печи пересыпные на газообразном топливе; 3) печи с кипящим слоем.

Печь шахтная пересыпная на твердом топливе. На рис. 55 приведена конструкция шахтной пересыпной печи на твердом топливе для содового производства.

В зависимости от производительности печи вертикальная кирпичная шахта имеет различные размеры. Диаметр печи меняется от 2,3 до 8 м, высота от 12,3 до 36,6 м. Внутренний диаметр печи зависит от величины съема извести с 1 м² сечения. Увеличение диаметра печи связано с неравномерностью распределения шихты и воздуха по ее сечению.

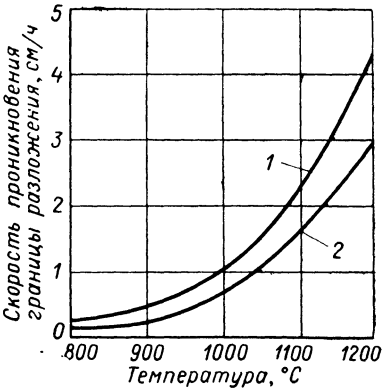


Рис. 54. Зависимость скорости проникновения границы разложения известняка от температуры:

1 — для кусков мела цилиндрической формы; *2* — для кусков известняка неправильной формы.

Выгрузное устройство в печи — улита имеет диаметр 4,5 м. В зоне обжига шахта имеет цилиндрическую форму. Вверху и внизу шахта имеет коническую форму. Сужение в верхней части обусловлено уменьшением габарита загрузочного механизма и облегчением более равномерного распределения шихты. Сужение в низу печи вызвано использованием улиты с диаметром 4,5 м и с целью улучшения теплообмена между охлаждаемой известью и нагревающимся воздухом при меньшем сечении печи. Шахта печи покоится на восьми массивных чугунных опорных колоннах, на которые положено чугунное кольцо, являющееся основанием огнеупорной футеровки. Опорные колонны установлены на бетонный фундамент. Зону обжига в печи футеруют хромомагнезитовым кирпичом марки МХС7 и МХС14 в два слоя, 1-й толщиной 340 мм и 2-й — 230 мм. Хромомагнезитовый кирпич обладает высокой огнеупорностью и термостойкостью

Таблица 26

Примерный состав технологического топлива (в %)

	Кокс 2-го сорта	Антрацит марки АК		Кокс 2-го сорта	Антрацит марки АК
$C^р$	84,30	76,25	$A^р$	12,57	14,06
$H^р$	0,73	1,34	$V^р$	1,83	3,44
$N^р + O^р$	0,61	0,86	$W^р$	0,88	4,63
$S^{об}$	0,91	2,76	$Q^р_н$, кДж/кг . .	28 961	28 973

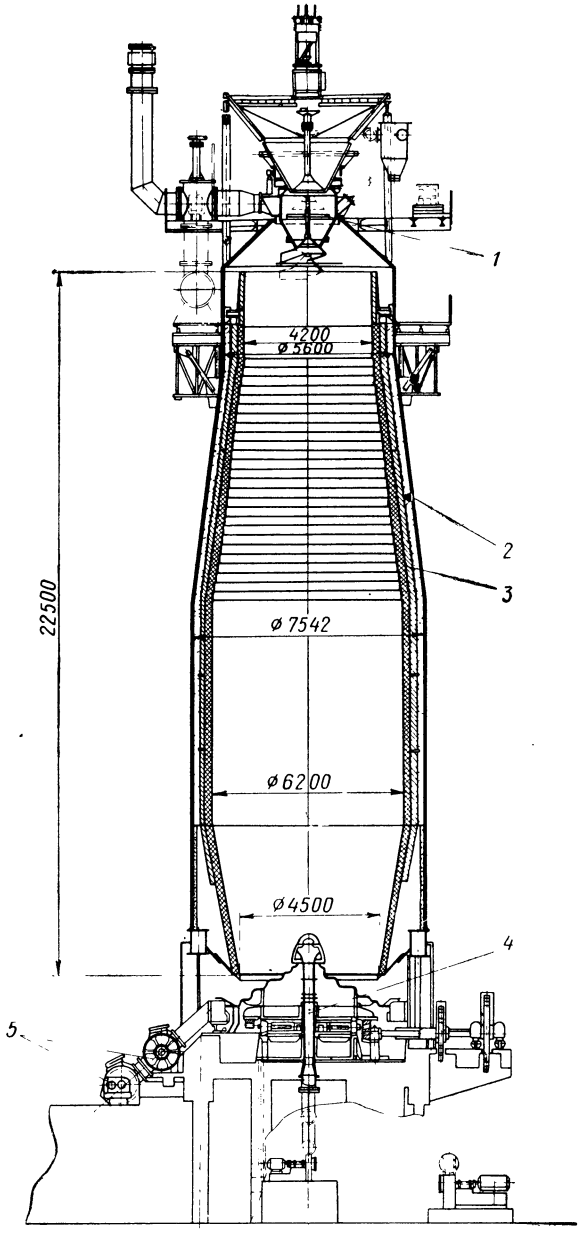


Рис. 55. Печь шахтная пересыпная на твердом топливе:
1 — загрузочное устройство; *2* — кожух; *3* — футеровка; *4* — устройство для выгрузки; *5* — установка ячейковых выгружателей.

и может находиться в работе между капитальными ремонтами более продолжительное время, чем шамотный. В зоне подогрева и охлаждения 1-й слой футеровки кладут из шамотного кирпича толщиной 340 мм и 2-й — из красного. Между слоями кирпича оставляют воздушный зазор 20 мм, позволяющий расширяться футеровке во время нагревания печи. Швы кладки должны быть не более 1 мм в зоне обжига и не более 2 мм в зоне подогрева и охлаждения.

Необходимо помнить, что при футеровке шахтной известково-обжигательной печи нельзя допускать попадания в шамотный порошок известковой пыли, так как при обжиге это может вызвать образование плава в стыках между кирпичами и разрушение футеровки. Снаружи футеровка заключена в металлический кожух, предназначенный для создания герметичности и механической прочности печи. Кожух сваривают из листовой стали внизу толщиной 16 мм, в середине 14 мм и вверху 12 мм. Между кожухом и кладкой предусматривается термоизоляционная прослойка в виде засыпки из молотого шамота толщиной в зоне обжига 130 мм, а в зоне охлаждения и подогрева 90 мм.

Необходимый для горения кокса воздух подают специальным вентилятором в печь снизу с избытком на 5—6% от теоретически необходимого.

Загрузочное устройство (рис. 56) предназначено для равномерного распределения как карбонатного сырья по гранулометрическому составу, так и топлива между кусками карбонатного сырья по сечению печи. При высыпании кускового материала происходит разделение (агрегация) кусков: более крупные откатываются в сторону, а более мелкие сосредоточиваются в середине.

Так, если ссыпать из загрузочного устройства шихту в центр печи, то обнаружится, что около стен окажутся крупные куски, а в центре мелкие. Такое распределение нежелательно, поскольку газы, проходящие через толщину содержимого печи, будут проходить в большом количестве около стен печи между большими кусками, и в меньшем в середине печи. В общем обжиг будет идти неравномерно по сечению печи.

Для обеспечения равномерного распределения шихты по сечению имеются два устройства: первое — нижний конус, имеющий спиралеобразную форму, которая способствует падению кусков шихты в разные места сечения. Кроме того, прикрепленный к конусу отбойник в виде стальной полосы отражает ударяющиеся об нее куски, направляя их в середину сечения. Этот нижний конус при опускании делает, кроме того, поворот вокруг оси на 60°, чем обеспечивает дополнительное рассеивание кусков шихты. Второе устройство — это средний поворотный бункер, который поворачивается при каждой загрузке шихты на 60°.

Поворотный бункер уменьшает сегрегацию при его загрузке из вагонеток воздушно-канатной дороги.

Погрузочное устройство имеет второй конус, выше расположенный. Два конуса обеспечивают до некоторой степени герметичность загрузочного устройства на верху печи.

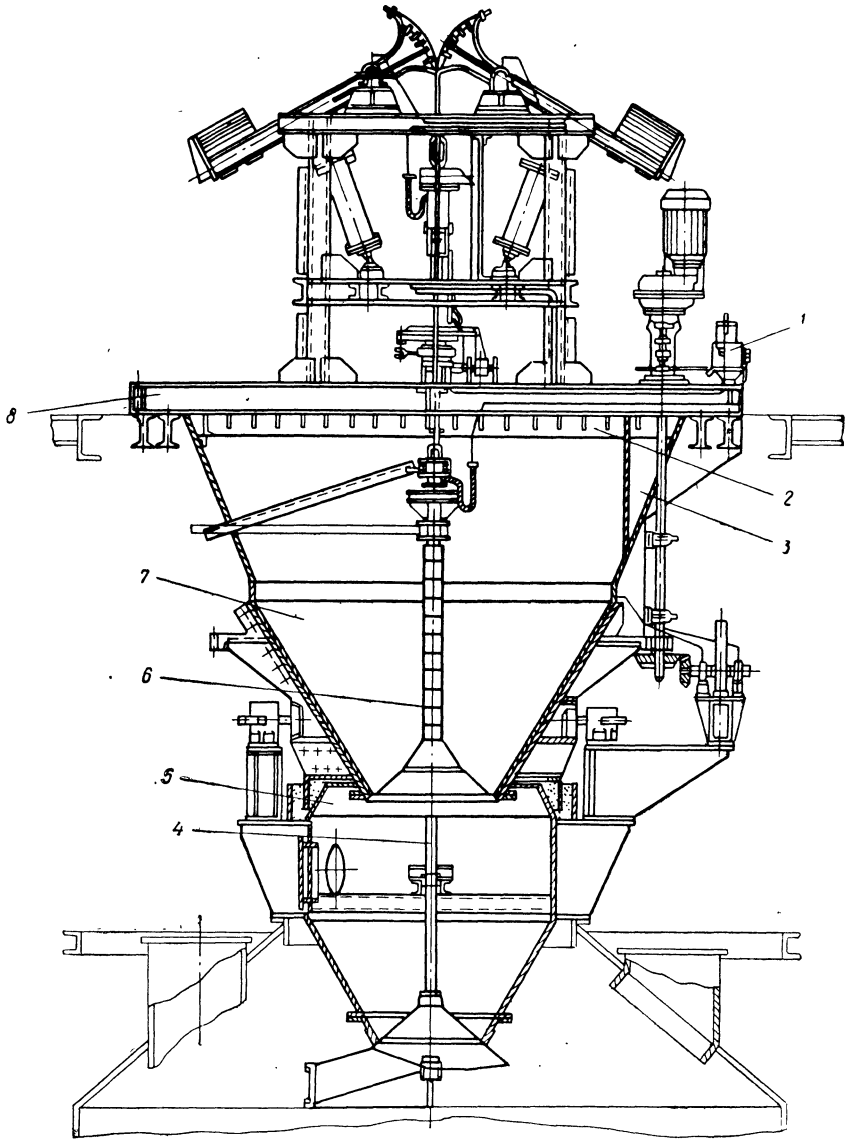


Рис. 56. Загрузочное устройство:

1 — узел смазки; *2* — верхняя решетка; *3* — приемная воронка; *4* — загрузочное устройство; *5* — воронка нижнего конуса; *6* — верхний конус с траверсой; *7* — вращающаяся воронка с приводом; *8* — рама.

Выгрузочное устройство. В качестве выгрузочного устройства принимается улита с диаметром 4,5 м, конструкция ее приведена на рис. 57.

Улита сделана из чугуна СЧ 16-36 и состоит из двух половин, скрепляемых болтами. Поверхность улиты выполнена в виде спирали с наклонными плоскостями. Она имеет съемный колпак, через который поступает воздух в центральную часть печи при помощи специального вентилятора, остальная часть воздуха поступает с боков улиты при помощи второго вентилятора через выходящую из печи известь. Колпак на улите лучше применять остроконечный вместо плоского и несколько смещенный по отношению оси улиты. Колпак в этом случае будет совершать круговое движение, что будет способствовать разрыхлению образовавшихся козлов.

Вследствие трения об улиту известь совершает в печи вращение, при котором происходит трение между кусками и ее измельчение.

Улита лежит на восьми роликах, опираясь на них стальным кольцом, и катится по круговому рельсовому пути, представляющему собой такое же стальное кольцо. Улита вращается при помощи электромотора конической пары, состоящей из венцовой шестерни, зубьями, обращенными вниз, и приводной шестерни, связанной с червячным редуктором. При вращении улиты выходящая из нее известь движется по периферии улиты, чем обеспечивается равномерное оседание шихты по всему сечению печи. Известь равномерно осыпается по периферии улиты на расположенный ниже транспортер. При дутье, непревышающем 3000 Па, хорошее уплотнение в месте выгрузки получается при установке двух лопастных выгружателей.

Эксплуатационные данные печи диаметром 6,2 м по стандартной 85% извести:

Удельная производительность на 1 м³ полезного объема печи	0,5—0,6/т (м³ · сутки)
Удельная производительность на 1 м² полезного сечения печи	8,3—10/т (м² · сутки)
Состав извести:	
не менее	75% CaO
не более	12,5% $CaCO_3$
Температура выходящей извести	не более 75 °С
Температура газа по выходе из печи:	
при работе на меле	не более 175 °С
при работе на известняке	250 °С
Давление газа на верху печи	≃ 50 Па

Печь шахтная пересыпная на газовом топливе. На рис. 58 приведена конструкция шахтной пересыпной печи на газовом топливе производительностью 200 т/сутки известняка.

Известково-обжигательная печь представляет собой прямую шахту круглого сечения с внутренним диаметром 4,3 м, выложенную из огнеупорного шамота-легковеса. Внутри шахта футерована огнеупорным шамотным доменным кирпичом. В зоне горения шахта постепенно переходит из круглой в квадратную с закругленными углами. Для строительной прочности и предотвращения подсосов атмосферного воздуха шахта снаружи заключена в металлический

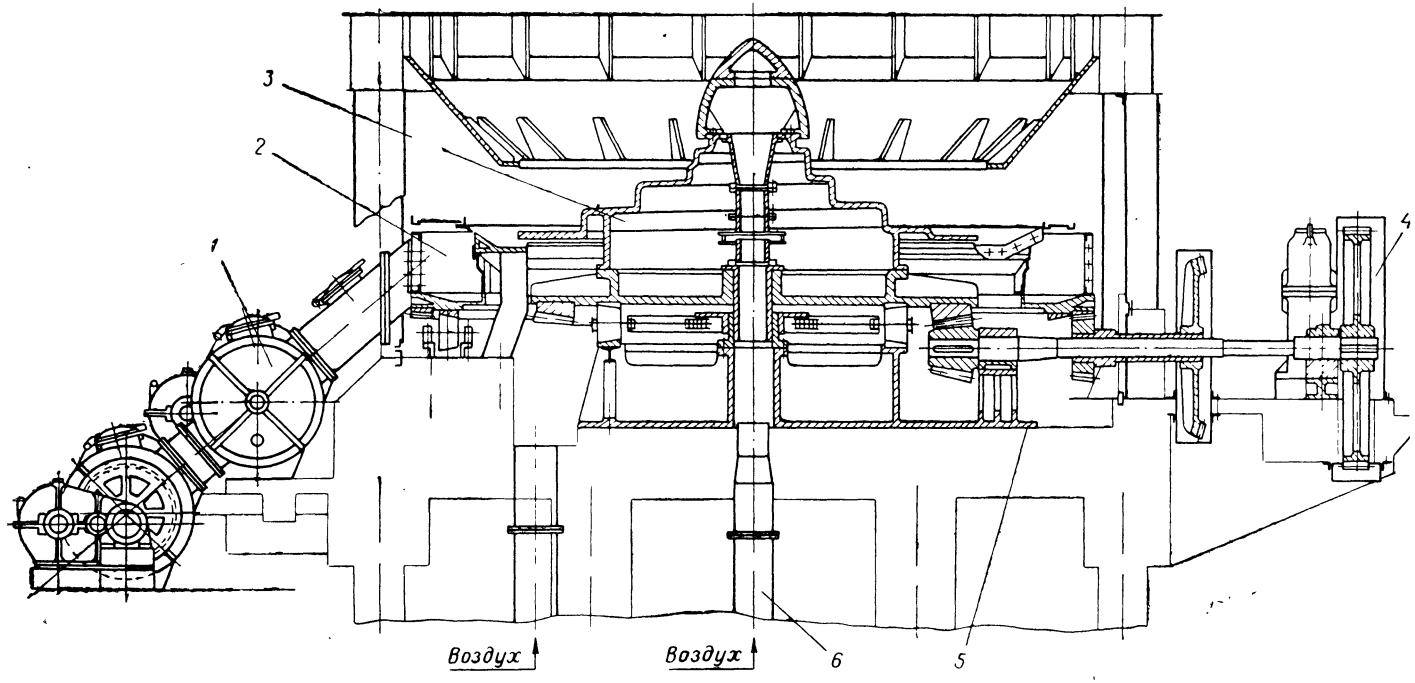


Рис. 57. Выгрузочное устройство:

1 — выгрузной трефель; *2* — кольцевой транспортер; *3* — улитка с приводом; *4* — механизм привода; *5* — опора; *6* — воздухопровод.

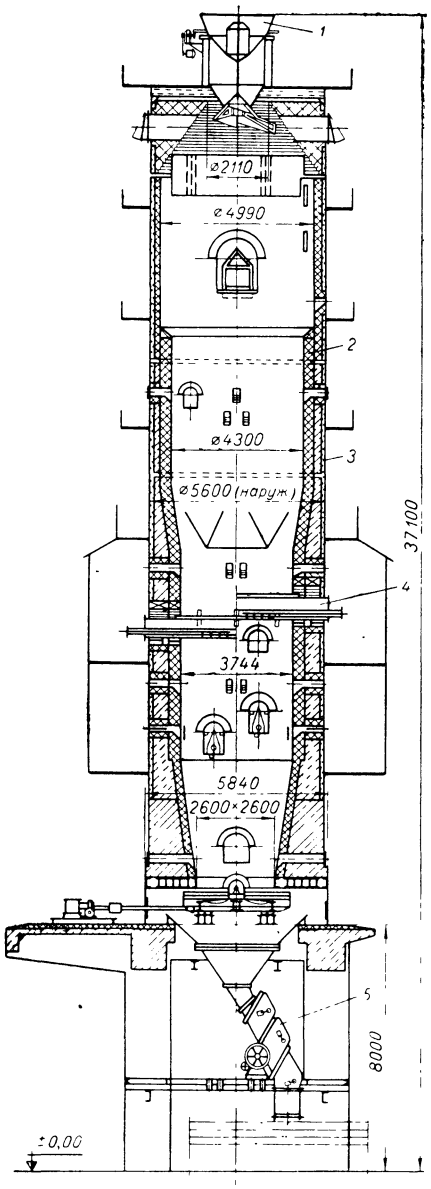


Рис. 58. Печь шахтная пересыпная на газовом топливе:

1 — устройство для загрузки; *2* — футеровка; *3* — кожух; *4* — горелка; *5* — механизм разгрузки.

кожух. Между кладкой печи и кожухом имеется шов толщиной 65 мм, заполненный теплоизоляционной засыпкой из сухого молотого трепела. Вся шахта покоится на железобетонной плите, опирающейся на железобетонные столбы. Для установки выгрузного механизма железобетонная плита имеет консоли, а шахта проемы, перекрываемые металлическими балками, заделанными в кладку печи.

Питание печи известняком производится из бункера, к которому подвешен электровибрационный питатель. Дозирование обеспечивается регулированием продолжительности работы электровибрационного питателя с помощью реле времени.

Подъем ковша с известняком из приямка скипового подъемника до загрузочного устройства печи и спуск порожнего ковша осуществляется электролебедкой. Загрузочное устройство печи (рис. 59) состоит из двух конических воронок и двух клапанов, открываемых и закрываемых поочередно специальным устройством, установленным на стволе скипового подъемника. Верхний клапан поднимается вверх, а нижний неравнобокий конус опускается вниз и при подъеме поворачивается на 34°, чем обеспечивается распределение известняка по поперечному сечению шахты печи. Для более равномерного распределения известняка в печи верхняя воронка загрузочного устройства перед каждой разгрузкой поворачивается на углы 60°, 180°, 240°, 300° и 360°.

Печь оборудована верхним и нижним радиоактивными указателями уровня загрузки материала, являющимися датчиками автоматической загрузки печи известняком. Выгрузка извести из печи происходит при возвратно-поступательном движении каретки. Мелкие куски извести проваливаются через щелевидные отверстия в каретке (между колосниками), а более крупные куски сходят с торцовых сторон каретки. Печь работает на искусственной тяге, создаваемой дымососом. Подача воздуха в печь осуществляется специально установленным вентилятором. Для герметизации низа печи установлен шлюзовой затвор.

Трубопроводы отходящих газов снабжены герметичными поворотными шиберами с дистанционным управлением. При аварийной установке дымососа шибера в трубопроводах отходящих газов автоматически переключаются на режим естественной тяги.

Дымовые газы перед выбросом их в атмосферу проходят очистку в циклонах НИИОГАЗ ЦН-15. Замер температуры и разрежения в шахте предусмотрен на трех горизонтах. Кроме этого, предусмотрен замер температуры отходящих газов и разрежения на верху печи. Подача газа и первичного воздуха производится в двух ярусах через специальные балки, охлаждаемые водой. На каждом ярусе установлено по две балки, причем направление балок одного горизонта перпендикулярно к направлению балок другого. На каждом горизонте предусмотрено по шесть периферийных газовых вводов для возможности подачи незначительного количества газов.

Трубопроводы газа и воздуха оборудованы расходомерами для раздельного учета расхода воздуха и газа, подаваемого по горизонтам. На подводящих к печи трубопроводах газа и воздуха также

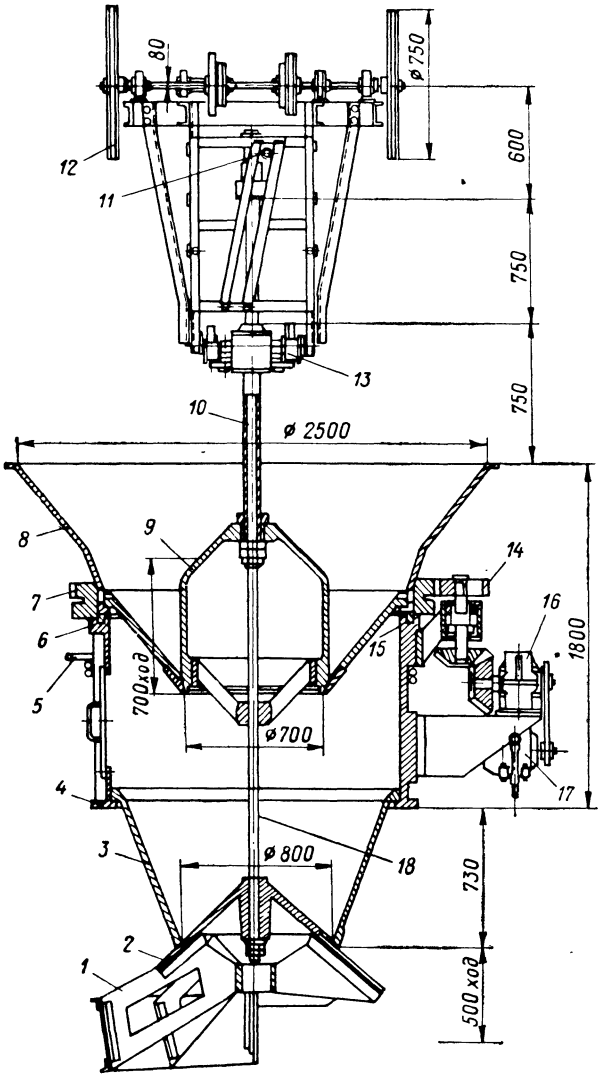


Рис. 59. Загрузочное устройство:

1 — отбойные пластины; *2* — нижний клапан; *3* — конический корпус; *4* — цилиндрический корпус; *5* — система смазки; *6* — лабиринт; *7* — венцовая шестерня; *8* — приемная воронка; *9* — верхний клапан; *10* — тяга; *11* — выступ; *12* — дифференциальные блоки; *13* — роликовая муфта; *14* — подвенцовая шестерня; *15* — асбест; *16* — редуктор; *17* — электродвигатель; *18* — шток.

установлены расходомеры и приборы для автоматического поддержания заданного соотношения газ — воздух.

Подводящий к печи газопровод оснащен задвижкой и предохранительным запорным клапаном, который автоматически отключает подачу газа в печь в случаях: падения разрежения в шахте печи, падения давления газа и воздуха в подводящих трубопроводах, прекращения подачи охлаждающей воды в балки или повышения температуры воды в балках выше допустимой (85 °С). Подбор печей производят по каталогу Гипростроома.

Характеристика печи:

Производительность	200 т/сутки
Фракция обжигаемого известняка	50—100 и 100—150 мм
Топливо	Природный газ
Расход топлива на 1 т извести (при $Q_н^р$ = =35,6 МДж/м³)	128 т
Внутренний диаметр шахты	4300 мм
Размеры шахты в зоне горения газа	3740×3740 мм
Рабочая высота шахты	19 000 мм
Средняя площадь поперечного сечения шахты в зоне обжига и подогревания	13,6 м²
Плоскостное напряжение шахты в зонах обжига и подогревания	14,7 т/(м²·сутки)
Система подачи газа в печь	Двухъярусная с внутренним вводом
Расчетная температура отходящих газов	300 °С

Печь шахтная пересыпная, на газовом топливе с центральной газовой горелкой. На рис. 60 приведена конструкция шахтной печи с центральной газовой горелкой.

Отличительным признаком рассматриваемой конструкции шахтной печи от печей с балочными горелками является то, что в зоне охлаждения печи устанавливается горелка для подачи 50% расходуемого газового топлива и рециркуляционного газа из выхлопного патрубка дымососа печи при изменении системы подачи газа периферийными горелками. Для осуществления подачи топливного газа в зону охлаждения шахтной печи необходимо уменьшить скорость горения его при определенных температурах. Это достигается уменьшением концентрации реагирующих компонентов в смеси (например, метан и кислород). Разбавление осуществляется введением инертных компонентов (например, N_2, CO_2, H_2O).

Уменьшение концентрации метана и кислорода за счет введения в горючую смесь инертных газов обусловливает резкое снижение скорости реакции. В этом случае скорость горения принимает вид:

$$\omega = kc_1c_2E^{-E/RT} \quad \text{или} \quad \omega = k\left(\frac{c_1 \cdot 100}{100+n}\right)^a \left(\frac{c_2 \cdot 100}{100+n}\right)^b E^{-E/RT}$$

где k — константа, равная 10^{-10} см³/с; c_1, c_2 — концентрации реагирующих веществ, моль·см³; R — газовая постоянная; E — минимальная величина энергии, обеспечивающая столкновение реагиру-

ющих молекул (энергия активации), Дж/моль; T — температура, К; n — содержание добавленных к газовоздушной смеси инертных примесей (сверх 100%).

В печах с центральным вводом газа имеется полная возможность направленного регулирования сжигания метана, так как это обусловливает самовоспламенение газа при более высоких температурах, соответствующих концу зоны обжига.

Применение газа с газовоздушной инертной смесью с коэффициентом инертности выше единицы обусловливает смещение пределов взрываемости в область значений, превышающих реальную концентрацию газа в газовоздушно-инертной смеси.

На температуру воспламенения газовоздушно-инертной смеси влияет средний диаметр межкусковых пустот в плотном слое материала $d_{ср}n$, а также повышение значений коэффициента инертности m. На рис. 61 приведена зависимость температуры от коэффициента инертности.

Зависимость нижнего предела воспламенения газовоздушно-инертной смеси от температуры приведена на рис. 62.

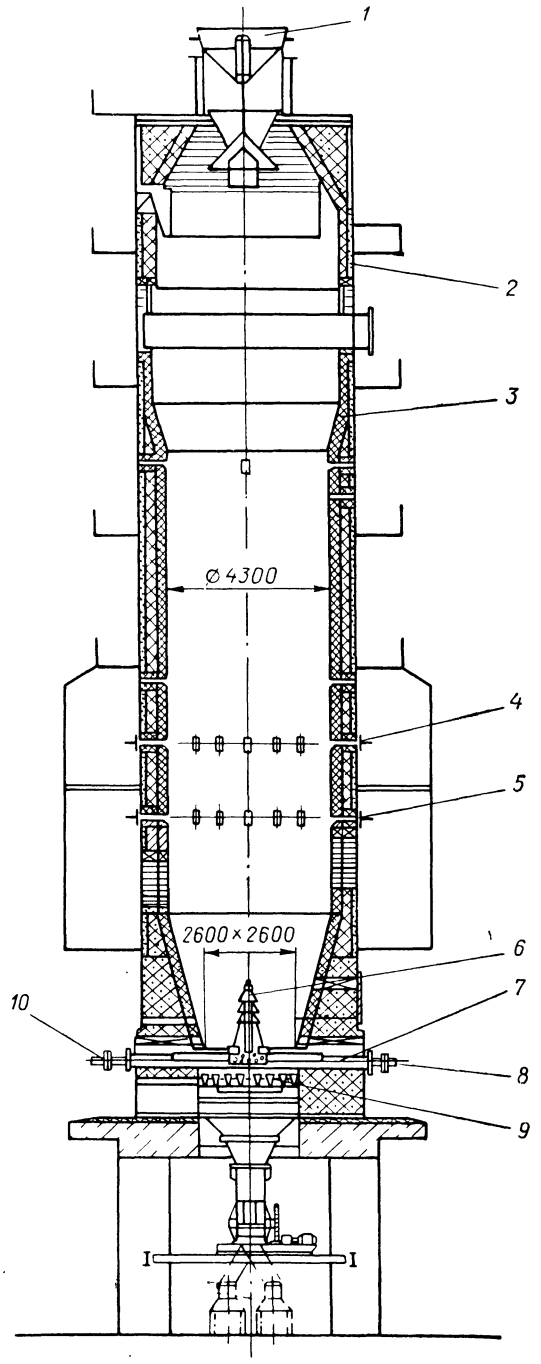


Рис. 60. Печь шахтная пересыпная на газовом топливе с центральной газовой горелкой:

1 — механизм загрузки; *2* — корпус; *3* — футеровка; *4* — верхний ярус периферийных горелок; *5* — нижний ярус периферийных горелок; *6* — центральная горелка; *7* — гребень; *8* — разводка воздуха; *9* — механизм разгрузки; *10* — разводка газа.

Известково-обжигательная печь представляет собой вертикальную шахту круглого сечения, выложенную огнеупорным шамотным кирпичом, верхняя часть шахты (в зоне отбора дымовых газов)

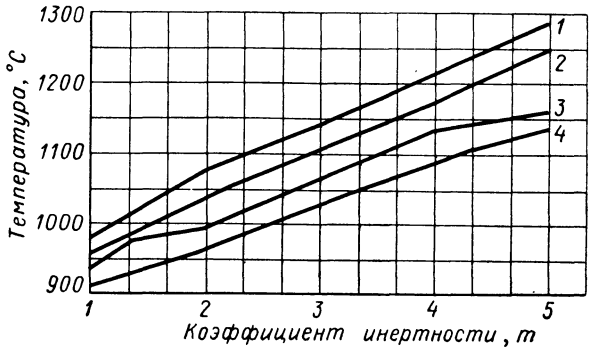


Рис. 61. Зависимость температуры воспламенения газа от коэффициента инертности:
1 — $\alpha = 1{,}25 \div 1{,}3$; $d_{ср.\,п} = 4$ мин; *2* — $\alpha = 1{,}25 \div 1{,}3$; $d_{ср.\,п} = 10$ мм: *3* — $\alpha = 1{,}8 \div 2{,}0$; $d_{ср.\,п} = 4$ мм; *4* — $\alpha = 1{,}8 \div 2{,}0$; $d_{ср.\,п} = 10$ мм.

выкладывается в два слоя толщиной 230 мм, средняя (зона подогрева и обжига внутренним диаметром 3,2 м) в два слоя: внутренний слой толщиной 345 мм из огнеупорного доменного кирпича и наружный толщиной 230 мм из огнеупорного шамота-легковеса.

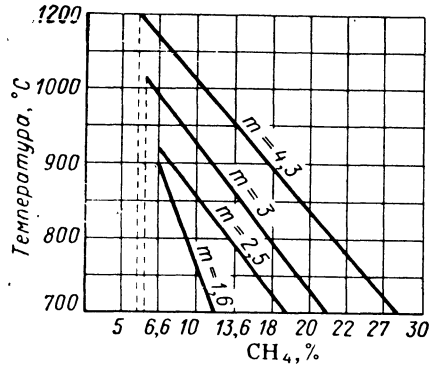


Рис. 62. Зависимость нижнего предела воспламенения газовоздушной смеси от температуры при $d_{ср.\,п} = 10$ мм.

В зоне охлаждения извести шахта внутри с круглой формой постепенно переходит в квадратную 2200×2200 мм для установки выгрузочного устройства.

Для обеспечения строительной прочности и предотвращения подсосов атмосферного воздуха в шахту печь снаружи заключена в металлический кожух. Между кладкой печи и кожухом имеется шов толщиной 65 мм, заполненный теплоизоляционной засыпкой из сухого молотого трепеля.

Верх печи перекрыт металлической плитой, на которую опирается загрузочное устройство и головка скипового подъемника.

Вся шахта печи покоится на железобетонной плите, опирающейся на железобетонные столбы. Для установки выгрузочного механизма шахта печи имеет проемы, перекрываемые металлическими балками, заделанными в кладку печи, а для установки привода железобетонная плита имеет консоли. Питание печи известняком производится при

помощи скипового подъемника. Загрузка ковша скипового подъемника производится с помощью вибропитателя.

Подъем ковша с известняком из приямка скипового подъемника до загрузочного устройства печи и спуск порожнего ковша осуществляется электролебедкой.

Загрузочное устройство печи состоит из двух конических воронок и двух клапанов, открываемых поочередно специальным устройством, установленным на стволе скипового подъемника.

Верхний клапан поднимается вверх, а нижний неравнобокий конус опускается вниз и при подъеме поворачивается, чем обеспечивается распределение известняка по поперечному сечению шахты печи.

Для более равномерного распределения шихты в печи воронка загрузочного устройства перед каждой загрузкой поворачивается на углы, прогрессивно возрастающие с каждым циклом.

В печи предусмотрено автоматическое поддерживание заданного уровня загрузки печи.

Скиповой подъемник с лебедкой и загрузочное устройство печи работают в автоматическом режиме.

Датчиками автоматической загрузки печи известняком являются верхний и нижний указатели уровня загрузки, которыми оборудована печь. Заполнение ковша подъемника должно производиться регулированием продолжительности работы вибропитателя с помощью реле времени. Выгрузка извести из печи производится выгрузочным механизмом, представляющим собой металлический стол, набранный из наклонных колосников, расположенный под шахтой и имеющий возвратно-поступательное движение. Над столом выгрузного механизма в шахте печи установлен полый металлический гребень (рассекатель).

Печь работает на природном газе. Подача газа в зону обжига осуществляется центральной горелкой, что позволяет вести обжиг в центральном круге печи. Обжиг известняка в периферийном кольце производится двумя ярусами периферийных фурменных воздухоохлаждаемых горелок конструкции ВНИИстром. В каждом ярусе установлено по 8 горелок.

Печь работает при искусственной тяге, создаваемой дымососом. Подача воздуха в печь осуществляется вентилятором. Для герметизации низа печи установлен шлюзовой затвор.

Для предотвращения воспламенения газа в зоне охлаждения в центральную газовую горелку подаются инертные отработанные газы, отбираемые от выхлопного патрубка дымососа. Подача рециркуляционного инертного газа осуществляется вентилятором.

Трубопроводы отходящих газов снабжены герметичными поворотными шиберами с дистанционным управлением, которые при аварийной остановке дымососа автоматически переключаются на режим естественной тяги.

Замер температуры и разрежения в шахте печи предусмотрен на трех горизонтах и у центральной горелки, а также температуры отходящих газов и разрежения на верху печи.

Подача воздуха на горение производится: 1) через низ печи под выгрузочный механизм и 2) непосредственно в зону обжига через периферийные фурменные горелки.

Трубопроводы газа, воздуха и рециркуляционного газа оборудованы расходомерами. На подводящих к печи трубопроводах также установлены расходомеры и приборы для автоматического поддержания заданного соотношения газ — воздух и газ — рециркуляционный газ. Газопровод оснащен задвижкой и предохранительно запорным клапаном, который автоматически отключает подачу газа в печь в случаях: падения разрежения в шахте печи, падения или повышения давления газа и воздуха в подводящих трубопроводах, прекращения подачи инертных рециркуляционных газов и повышения температуры в зоне центральной горелки свыше 600 °С. Конструкция горелок описана на стр. 364 и 365.

Техническая характеристика печи:

Производительность	100 т/сутки
Фракция обжигаемого известняка	50—100 и 100—150 мм
Топливо	Природный газ
Расход природного газа на 1 т известняка	136 м³
Внутренний диаметр шахты	3,2 м
Рабочая высота шахты	18 »
Средняя площадь поперечного сечения в зонах обжига и подогрева	8,32 м
Плоскостное напряжение шахты в зонах обжига и подогрева	12,5 т/(м² · сутки)
Напряжение шахты в зонах обжига и подогрева	0,7 т/(м³ · сутки)
Система подачи газа в печь (в %):	
в центральную горелку	50
через 2 яруса периферийных фурменных горелок	50
в том числе:	
в нижний ярус	29
в верхний ярус	21
Расчетная температура отходящих газов	380 °С
Количество рециркулируемого газа	850 м/ч
Температура рециркулируемого газа	240 °С

Печь с кипящим слоем. Особенность обжига в кипящем слое состоит в том, что при движении нагретого газа через слой мелкозернистого известняка происходит непрерывная циркуляция частиц. Большая поверхность соприкосновения их с газовым теплоносителем способствует быстрому протеканию физико-химических процессов, что позволяет осуществить процесс обжига в комнатных установках при высокой интенсивности.

В печах с многоступенчатыми кипящими слоями движение известняка из камеры в камеру осуществляется путем последовательного перетока по трубам, минуя поток газов.

Печи могут работать как на природном газе, так и на мазуте. Оптимальная температура обжига известняка 1000—1050 °С. При этих условиях получается известь с содержанием 85,4% $CaO_{акт}$ и 2,38% CO_2.

Зависимость степени обжига известняка от температуры в однокамерной печи приведена на рис. 63.

На рис. 64 приведена зависимость степени обжига известняка от времени его пребывания в печи при оптимальной температуре.

На рис. 65 приведена конструкция печи для обжига известняка в кипящем слое производительностью 300 т/сутки на природном газе.

Печь имеет вид цилиндрической шахты, состоящей из четырех камер. В двух верхних камерах осуществляется предварительный подогрев известняка, в остальных — обжиг и охлаждение. Камеры подогрева и обжига выполнены из огнеупорного материала. Свод

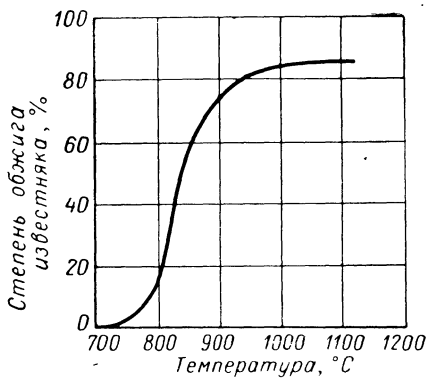


Рис. 63. Зависимость степени обжига известняка от температуры псевдоожиженного слоя.

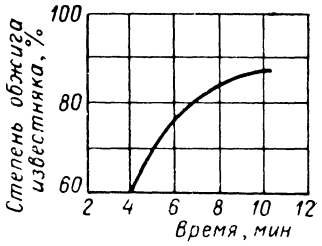


Рис. 64. Зависимость степени обжига известняка от времени пребывания его в слое при 1000 °С.

печи выполнен из подвесных огнеупорных блоков. Газораспределительные решетки в камерах подогрева и обжига изготовлены из огнеупорного бетона в виде сводов с отверстиями, в которые вставлены сопла из нержавеющей стали. Футеровка печи заключена в металлический кожух.

Газораспределительная решетка камеры охлаждения выполнена металлической. Для предотвращения просыпания материала в дутьевую камеру на поверхность решетки укладывается металлическая сетка, а затем слой керамических шаров диаметром 20 мм, высотой 200 мм; толщина решетки 70 мм. Известняк поступает в верхнюю камеру, где в псевдоожиженном состоянии соприкасается с горячими газами, нагреваясь до 585 °С. Из нее по переточным трубам известняк переходит во вторую камеру подогрева и нагревается до 700 °С. После этого подогретый известняк по внешнему перетоку поступает в камеру обжига, где при средней температуре 1000 °С происходит обжиг. Горячие газы из камеры обжига сначала направляются в циклон, где большая часть пыли осаждается, после чего пропускается через вышерасположенные камеры. Обожженная известь перетекает в камеру охлаждения. В ней известь охлаждается, отдавая тепло подводимому в печь воздуху, который нагревается до

температуры 300 °С. Охлажденная известь через переточную трубу покидает печь и транспортируется в сборники.

В качестве топлива используется в данном случае природный газ, который сжигается непосредственно в слое и служит псевдоожижающим агентом.

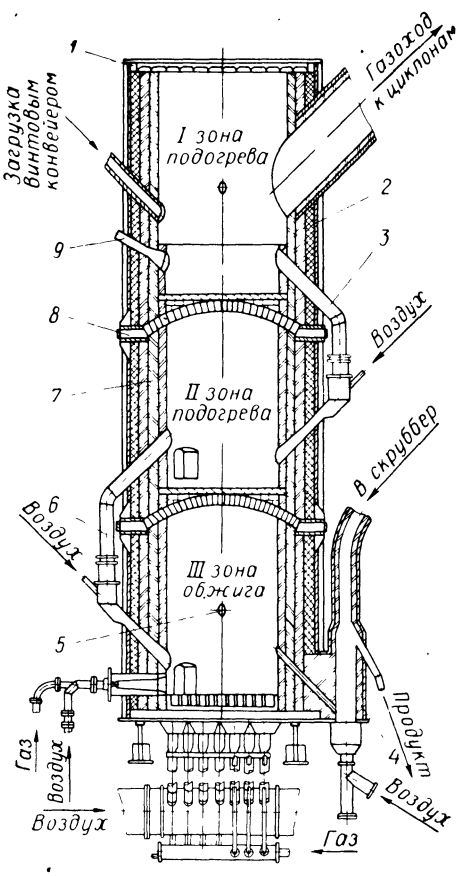


Рис. 65. Печь с кипящим слоем:

1 — свод печи; *2* — кожух; *3* и *6* — перетоки; *4* — камера выдачи; *5* и *9* — гляделки; *7* — футеровка; *8* — газораспределительная решетка.

Особенностью приведенной конструкции печи является оборудование ее горячими циклонами, благодаря которым используется большая часть пылевидной обожженной извести, выносимой из камеры обжига с потоком газов. Кроме того, улучшается работа газораспределительных решеток верхних камер, так как продуваемый через них газ оказывается менее запыленным. Горячий циклон выполнен из малоуглеродистой стали и футерован внутри огнеупорным материалом.

Печи производства катализаторов

Общие сведения. Катализаторы — вещества, в присутствии которых изменяются скорости химических реакций. Технология приготовления катализаторов различна: одни получают плавлением составляющих элементов в печах, другие — механическим смешиванием компонентов, грануляцией и прокаливанием в печах, а третьи — прокаливанием после пропитки их активными компонентами.

Прокаливание — одна из важных операций в производстве катализаторов. При прокаливании, вследствие термической диссоциации, получается собственно активное вещество катализатора и происходит его упрочнение и окончательно формируется их пористая структура. Условия прокаливания (температура, время, сырье) в значительной степени определяют средний диаметр пор и величину поверхности полученной контактной массы. Прокаливание обычно проводят при температурах равных или выше температур проведения каталитической реакции.

Печи производства плавленых катализаторов. Для синтеза NH_3 катализаторами служат восстановленные окислы железа с тремя, четырьмя и пятью промоторами (железные катализаторы). Для приготовления катализаторов СА-1 с пятью промоторами (Al_2O_3, SiO_2, MgO, CaO, K_2O) используют специальное технически чистое малоуглеродистое железо, содержащее мало примесей. Плавление железа с введением промоторов осуществляется в индукционной электропечи. В тигель печи загружают 150 кг сырья. Мощность печи составляет 100 кВт при нормальном токе генератора 150 А. Плавление проводят при 1600 °С и длится оно 1,5 ч. В процессе плавки в печь вводят промоторы.

Для окисления нафталина во фталевый ангидрид используют катализатор из плавленой пятиокиси ванадия, получаемой в виде гранул неправильной формы. Пятиокись ванадия в виде порошка или кусков контакта расплавляют в графитовых тиглях в электропечах при 690 °С.

Печи производства катализаторов, получаемых механическим смешиванием катализаторов. У всех катализаторов этого типа на одной из начальных стадий производства компоненты механически смешивают друг с другом.

К таким катализаторам относятся сульфо-ванадо-диатомитовый катализатор (СВД), который предназначен для окисления SO_2 в SO_3. По технологии предварительно смешанные компоненты катализатора гранулируются в грануляторе и поступают в печь с вращающимся барабаном. Топочные газы и сырье гранулы проходят в печи противотоком. Температура газа на входе в печь 580 °С, на выходе 200 °С. В процессе прокаливания образуется пиросульфованадат калия по реакциям:

$$2KHSO_4 = K_2S_2O_7 + H_2O$$

$$K_2S_2O_7 + V_2O_5 = K_2S_2O_7 \cdot V_2O_5$$

Степень превращения SO_2, определенная в стандартных условиях ($t = 485$ °С; $V = 4000$ $ч^{-1}$; $c_{SO_2} = 10\%$), должна составлять не менее 86%.

В последнее время предварительно смешанные компоненты катализатора таблетируются и прокаливаются в шахтных печах, конструкции которых будут описаны далее.

Печи производства катализаторов на носителях, получаемых методом пропитки. Катализаторы на носителях получают нанесением активных компонентов на пористую основу (носитель). Носитель является малоактивным или инертным материалом. Обычно пористую основу пропитывают раствором, содержащим не активные компоненты катализатора, а соединения, которые переходят в эти компоненты при соответствующей термической обработке. Чаще применяют соли, анионы которых легко удалить при прокаливании.

Печи производства ванадиевых катализаторов. Ванадиевые высокоактивные катализаторы предназначены для использования в сернокислотном производстве для окисления

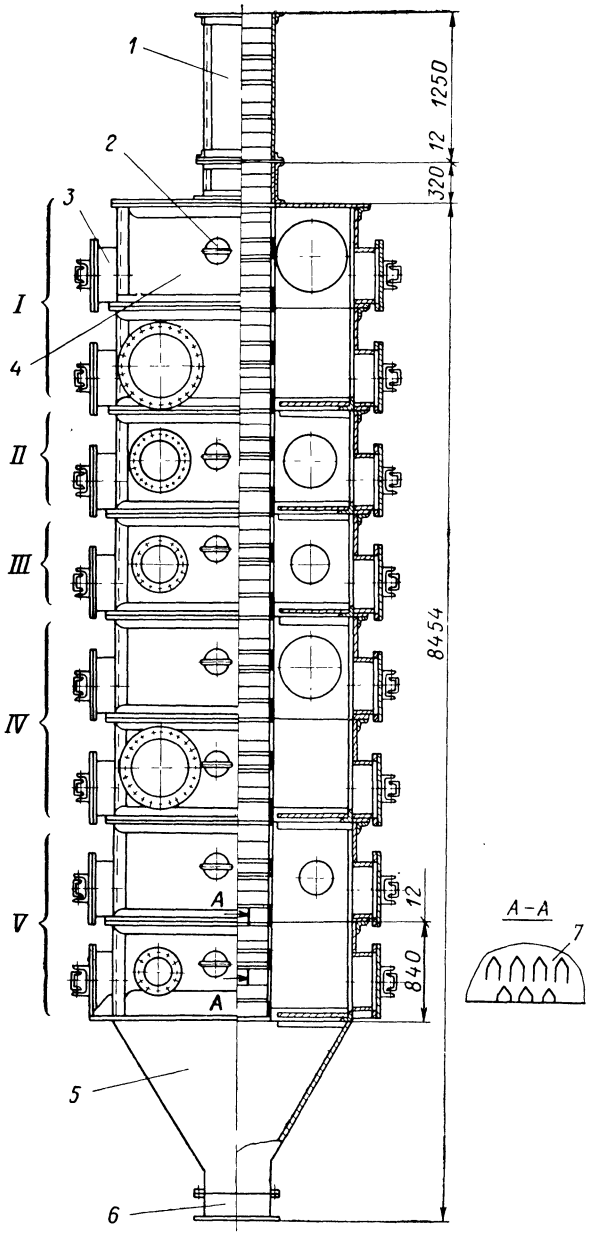


Рис. 66. Печь шахтная, многозонная:

1 — загрузочный короб; *2* — смотровой люк; *3* — люк; *4* — секция печи; *5* — разгрузочный конус; *6* — механизм разгрузки; *7* — короб.

сернистого газа и в зависимости от условий работы разделяются на два типа — высоко- и низкотемпературные.

В отличие от катализаторов СВД эти катализаторы имеют более высокую активность.

Производство ванадиевых катализаторов основано на получении порошкообразного силикагеля путем осаждения его из жидкого стекла, разбавленного серной кислотой. Сухой силикагель смешивают с ванадиевым щелоком, состоящим из пятиокиси ванадия и щелочи. Полученную смесь прессуют в таблетмашине с получением колец или гранул, затем сушат в ленточной сушилке и досушивают, прокаливают и охлаждают. Для этого применяют шахтные печи. Эти печи дают высокую равномерность прогрева катализатора при незначительных потерях из-за разрушения или истирания; они сравнительно просты и надежны в работе.

Печь шахтная, многозонная. Печь металлическая, сварная, сборная из семи отдельных прямоугольных секций, которые крепятся между собой болтами. Конструкция печи приведена на рис. 66. Печь имеет пять температурных зон: I зона — сушки, 2 секции; II и III зоны — нагрева, по 1 секции в каждой; IV зона — прокалки, 2 секции и V зона — охлаждения, 2 секции.

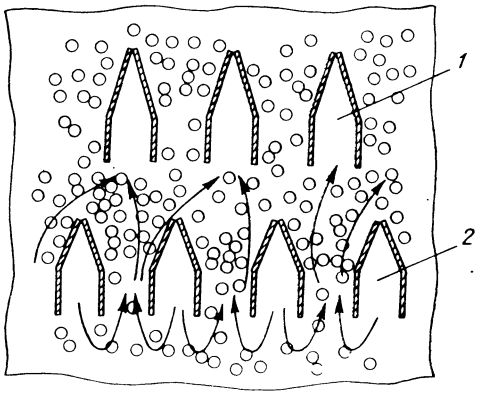


Рис. 67. Схема движения теплоносителя в шахтной печи:
1 — отсасывающий короб; *2* — нагнетательный короб.

Каждая секция печи состоит из трех камер: камера распределения теплоносителя или охлаждающего воздуха, рабочая камера, где протекают технологические процессы и камера сборная. Каждая зона имеет ввод теплоносителя или охлаждающего воздуха и вывод отработанного теплоносителя или нагретого воздуха.

Рабочая камера каждой секции имеет по два ряда нагнетающих и отсасывающих коробов-туннелей, приваренных со стороны распределительных и сборных камер; имеются отверстия для подачи или отсоса теплоносителя или воздуха. Каждая секция имеет люки для очистки и осмотра секций печи. Прокаливаемый катализатор загружают в загрузочную секцию и он движется вниз за счет действия сил гравитации. Катализатор движется в рабочей камере печи сплошной массой, обтекая короба-туннели и равномерно пронизываясь теплоносителем или охлаждающим воздухом.

Схема движения прокаливаемого катализатора и теплоносителя показана на рис. 67. Работа каждой зоны различна как по тепловому режиму, так и по расходу теплоносителя, поэтому для каждой зоны

теплоноситель определенного количества и требуемой температуры приготовляется в своем топочном устройстве сжиганием природного газа. Описание конструкции топки приводится далее.

Охлаждение катализатора осуществляется воздухом, подаваемым из цеха вентилятором, а отработанный теплоноситель и нагретый воздух отсасываются дымососом.

Материалом для изготовления корпуса секций в зоне сушки и I ступени зоны нагрева и охлаждения является сталь 3, а II ступени зоны нагрева и прокалки сталь Х17Н13М2Т. Короба-туннели в зоне сушки и I ступени нагрева изготовляются из стали Х18Н10Т, во II ступени нагрева и зоне прокалки изготавливаются из стали Х17Н13М2Т. В секциях каждой зоны имеются отверстия для установки приборов КИП, замеряющих температуру и давление распределительной и сборных камер. Нижняя часть печи имеет коническую форму и разгрузка производится через секторный затвор.

Для обеспечения безопасности обслуживающего персонала, а также уменьшения тепловых потерь печь теплоизолирована. Толщина теплоизоляции 240 мм. Снаружи печь покрашена масляной краской. Печь крепится к перекрытию здания цеха с помощью специальных металлических опор.

Техническая характеристика шахтной печи для прокалки ванадиевого катализатора приведена в табл. 27.

Печи производства ванадиевого сферического катализатора КС. Износостойкий и высокоактивный ванадиевый катализатор КС

Таблица 27

Техническая характеристика шахтной печи для прокалки ванадиевого катализатора

Показатель	Расчетные величины				
	I зона сушки	II зона	III зона	IV зона прокалки	Зона охлаждения
		зона нагрева			
Начальная и конечная влажность катализатора, %	W_1=30	W_2=0			
Количество испаряемой влаги, кг/ч	120				
Насыпная масса, т/м³	0,5—0,1				
Температура теплоносителя на входе в зону, °С	120	250	550	550	20
Температура теплоносителя на выходе из зоны, °С	100	220	470	470	40
Температура катализатора на входе в зону, °С	20	80	200	500	500
Температура катализатора на выходе из зоны, °С	80	200	500	500	40
Сопротивление слоя в направлении движения теплоносителя, Па	3760	4800	168	1190	360
Количество проходящего теплоносителя, м³/ч	22000	7000	1600	2700	3700
Время пребывания катализатора в зонах, ч	3	1,5	1,5	3	3

предназначен для окисления сернистого газа в кипящем слое катализатора. Производство катализатора КС основано на получении сферического носителя путем осаждения его из жидкого стекла раствором сульфата аммония с последующей пропиткой носителя специальным раствором, состоящим из ванадиевых щелоков и сульфата калия. После пропитки носитель сушат и прокаливают.

Печь КС с конвективно-радиационным нагревом предназначена для прокалки и охлаждения алюмосиликатного носителя катализатора КС в кипящем слое с радиационным нагревом.

Изотермичность при прокалке в кипящем слое исключает как локальные перегревы носителя, так и возможность недостаточного прокаливания: не происходит спекания и смешивания его. При этом прокалка совмещается с обкаткой носителя с целью удаления непрочного поверхностного слоя.

Конструкция печи приведена на рис. 68. Печь имеет цилиндрическую форму. Она выполнена из шамотного кирпича с толщиной футеровки 348 мм, теплоизолирована диатомовым кирпичом толщиной 232 мм и асбестовым листом толщиной 20 мм.

В низу печь имеет топочную камеру с горелкой ГНП-4. Цилиндрическая рабочая камера заканчивается сверху сферическим сводом из жаропрочного бетона. Под сводом симметрично установлены три газовые горелки. Раскаленные дымовые газы от сжигания природного газа нагревают свод до 1300 °С и он начинает излучать тепло на поверхность кипящего слоя носителя, создавая равномерный нагрев его.

Внутри печи установлена провальная газораспределительная решетка, которая разделяет внутренний объем печи на рабочую камеру (над решеткой) и на камеру подготовки теплоносителя (под решеткой).

Наружная поверхность футеровки заключена в сварной металлический кожух из листовой стали.

В топочной камере сжигается смесь природного газа и воздуха, предварительно приготовленная в горелке ГНП-4 с соплом Б. Для получения теплоносителя с температурой 800 °С раскаленные дымовые газы разбавляются вторичным воздухом.

Далее теплоноситель под давлением 6000 Па подают под металлическую продольную газораспределительную решетку из стали Х17Н13М2Т диаметром 1200 мм, которая имеет живое сечение 3% и создает кипящий слой носителя высотой 400—500 мм. Для исключения выброса пыли из рабочей камеры над кипящим слоем хвостовым дымососом создается разрежение 50—100 Па. Скорость теплоносителя в слое принята 0,7 м/с. Расход природного газа в топочной камере составляет 20 м³/ч, а в сводовых горелках 25 м³/ч. Температура отходящих газов из печи равна 800 °С. При этой температуре носитель в сушилке предварительно подсушивается.

Алюмосиликатный носитель через шлюзовый питатель с двигателем переменного тока по течке поступает в кипящий слой носителя в количестве 85 кг/ч. Его начальная влажность 15%. В кипящем слое происходит удаление влаги до 2,5% и прокалка носителя.

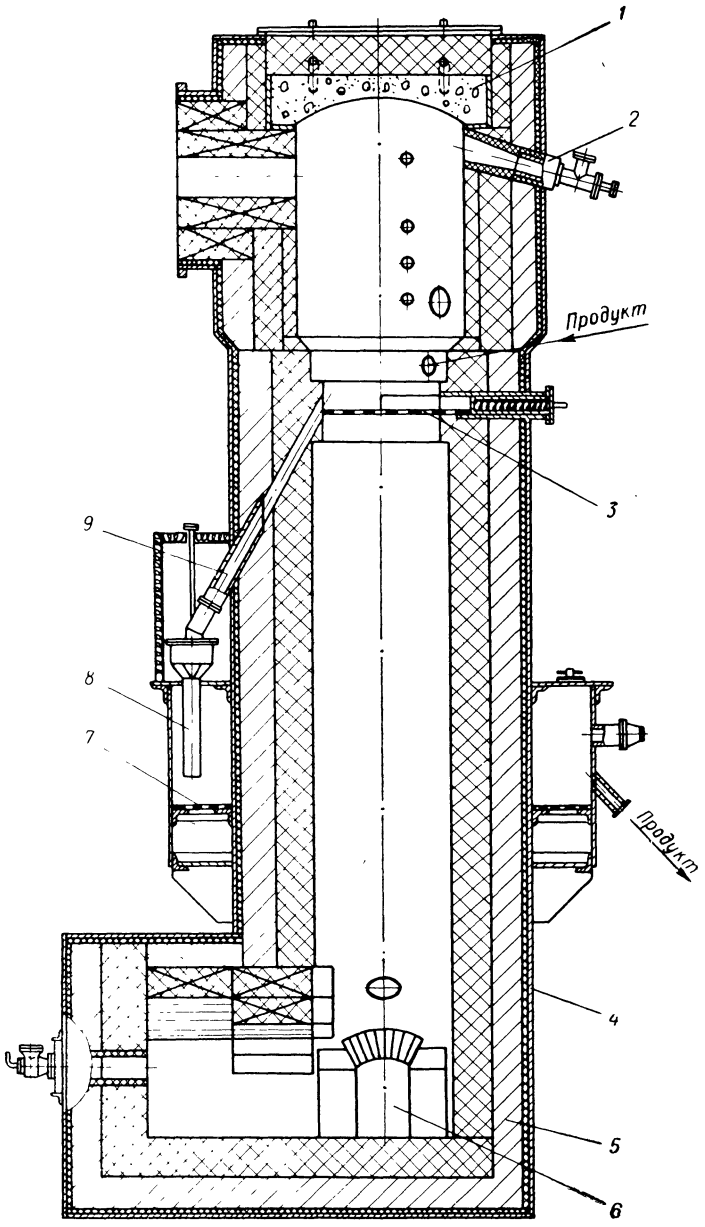


Рис. 68. Печь КС для прокаливания и охлаждения алюмосиликатного носителя катализатора КС:

1 — свод; *2* — горелка; *3* — прокалочная решетка; *4* — кожух; *5* — футеровка; *6* — лаз; *7* — охлаждающая решетка; *8* — течка; *9* — переток.

Прокаленный носитель с уровня газораспределительной решетки перетекает в металлическую камеру охлаждения, установленную вокруг печи, имеющую кольцеобразную форму шириной 500 мм. За счет воздуха, подаваемого вентилятором в подрешеточное пространство над газораспределительной решеткой, создается кипящий слой носителя и его охлаждение. Давление под решеткой 300 Па, разрежение над решеткой 100 Па. Скорость воздуха в слое составляет 0,5 м/с. Носитель поступает с температурой 800 °С и охлаждается до 40 °С и через течку, установленную на уровне решетки, и шлюзовой питатель, выгружается из печи. Нагретый воздух из камеры охлаждения подается в горелку ГНП-4 топочной камеры для образования газовоздушной смеси.

Во всех камерах имеются отверстия для установления приборов КИП, лазы, люки, гляделки, а также подсветка над кипящим слоем. Для розжига печи предусмотрена специальная отводная труба, изолированная минеральными матами толщиной 100 мм.

Печь шахтная многозонная предназначена для сушки, прокалки и охлаждения катализатора КС после пропитки (рис. 69).

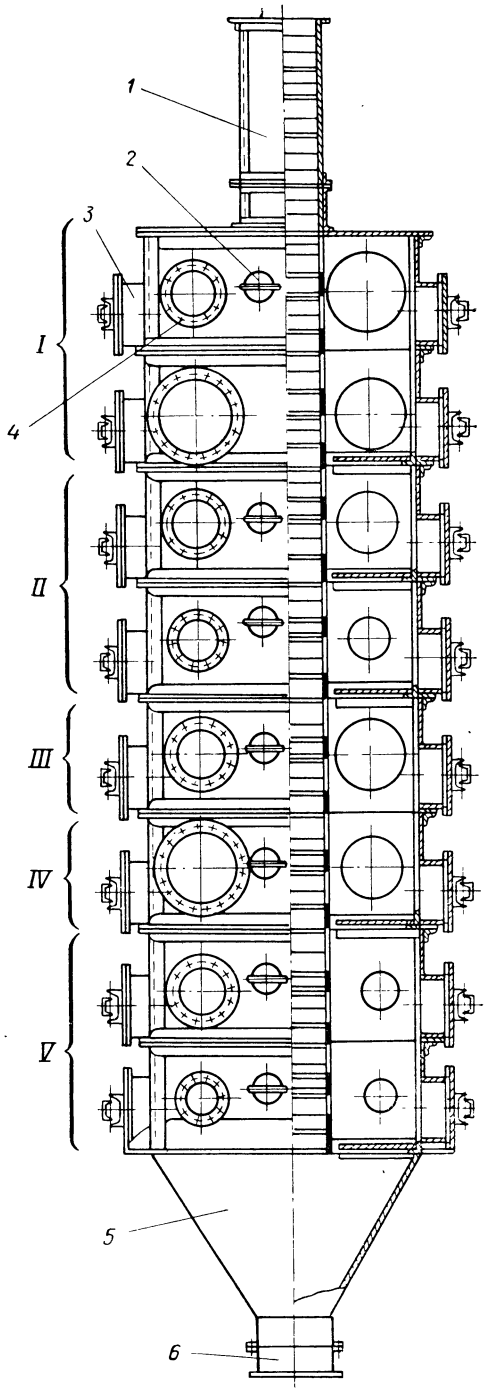


Рис. 69. Печь шахтная, многозонная:

1 — загрузочный короб; *2* — смотровой люк; *3* — люк; *4* — секция печи; *5* — разгрузочный конус; *6* — механизм разгрузки.

Таблица 28

Техническая характеристика шахтной печи для термообработки катализатора КС

Показатель	Расчетные величины				
	I зона сушки	II зона	III зона	IV зона прокалки	V зона охлаждения
		нагрев			
Начальная и конечная влажность, %	$W_н = 30$			$W_к = 0$	
Количество испаряемой влаги, кг/ч	27,8	2,2	—	—	—
Температура теплоносителя на входе в зону, °С	130	400	680	680	20
Температура теплоносителя на входе из печи, °С	110	350	600	600	23
Температура катализатора на входе в зону, °С	15	80	250	550	600
Температура катализатора на выходе из зоны, °С	80	250	550	600	50
Сопротивление слоя в направлении движения теплоносителя, Па	156	17	54	3	2
Количество проходящего теплоносителя, м³/ч	6800	900	700	100	1100
Материал корпуса печи	Сталь Х18Н10Т	Сталь Х17Н13М2Т	Сталь Х17Н13М2Т	Сталь Х17Н13М2Т	Сталь Ст. 3
Материал короба-туннеля	Сталь Х17Н13М2Т	Сталь Х17Н13М2Т	Сталь Х17Н13М2Т	Сталь Х17Н13М2Т	Сталь Х18Н10Т
Время пребывания материала в слое, ч	3	3	1,5	1,5	3,0

Печь имеет пять температурных зон: I зона — сушки, 2 секции; II зона — нагрева, 2 секции; III зона — нагрева, 1 секция; IV зона — прокалки, 1 секция и V зона — охлаждения, 2 секции. По конструкции эта печь отличается от печи, приведенной на рис. 66, высотой зон, диаметрами подводящих и отводящих патрубков. Тепловая мощность зон, тепловая мощность топок, обеспечивающих печь теплоносителем, также различны из-за разных температур теплоносителя в зонах.

Техническая характеристика шахтной печи для термообработки ванадиевого катализатора КС на алюмосиликатном носителе производительностью 100 кг/ч по влажному катализатору приведена в табл. 28.

Печь туннельная предназначена для сушки, прокалки и охлаждения высокотемпературного катализатора ИК-1 и ИК-2. Высокоактивные катализаторы получаются путем прокалки высокодисперсного носителя (кремнезема) раствором сульфата ванадия и бисульфата калия.

Печь имеет шесть температурных зон: I и II — сушки; III и IV — нагрева; V — прокалки; VI — охлаждения. Зоны I и II выполняются из армированного бетона марки 200, зоны III—V — из жароупорного бетона на портландцементе с золой и с базальтовым заполнителем. Внутри зоны футерованы шамотом-легковесом толщиной 232 мм.

Подвергаемый термообработке катализатор загружают на полки вагонетки: их в печи 10. Одиннадцатая вагонетка находится в шлюзе, где она охлаждается перед выдачей из печи.

Для обеспечения постоянства гидравлического и теплового режимов, печь имеет две шлюзовые камеры, создаваемые подъемными заслонками. Верх печи имеет 4 камеры, которые выполнены из железобетона. В рабочем пространстве печи разделение на зоны производится самими вагонетками, так как каждая вагонетка имеет в начале и конце сплошные поперечные стенки из стального листа. Вагонетки передвигаются в печи по рельсовому пути усилием толкателя, а выгружаются выталкивателем.

Теплоноситель для каждой температурной зоны подготавливается в специальных топках сжиганием природного газа. Конструкции топок рассматриваются на стр. 268.

В зоне сушки теплоноситель нагнетается и рециркулируется вертикальным вентилятором специальной конструкции, в которых крыльчатки изготовлены из жаропрочной стали.

Давление в печи поддерживается до 200 Па. Время нахождения в печи 10 ч. Техническая характеристика туннельной печи приведена в табл. 29.

Техническая характеристика шахтной многозонной печи для термообработки катализаторов ИК-1, ИК-2 производительностью 175 кг/ч по влажному катализатору приведена в табл. 30.

Печи производства катализаторов для конверсии окиси углерода. *Печь туннельная* предназначена для сушки, прокалки и охлаждения катализатора, используемого при конверсии окиси углерода. Конструкция печи приведена на рис. 70.

Таблица 29

Техническая характеристика туннельной печи для прокалки катализаторов ИК-1, ИК-2

Показатель	Расчетные данные					
	I зона сушки	II зона сушки	III зона нагрева	IV зона нагрева	V зона прокалки	VI зона охлаждения
Температура теплоносителя при входе в зону, °С . . .	40	120	230	340	350	20
Температура теплоносителя при выходе из зоны, °С . .	20	100	200	300	300	200
Температура катализатора при входе в зону, °С . . .	20	80	160	260	360	360
Температура катализатора при выходе из зоны, °С . .	40	80	200	300	300	40

Рабочая камера печи представляет собой туннель шириной 1390 мм и высотой 1260 мм. Стены печи футерованы красным кирпичом, перекрытие печи выполнено из жаропрочного бетона. Снаружи печь теплоизолирована диатомовым кирпичом. Футеровка печи заключена в металлический каркас из профильного проката. В футеровке печи предусмотрены отверстия для приборов КИП и гляделки. Внутри рабочей камеры установлены рельсовые пути, на которых одновременно находится семь вагонеток. На полках вагонетки уложено 3500 кг гранулированного катализатора, имеющего начальную влажность 20%. В начале и конце печи подъемными заслонками и дверями сделаны шлюзовые камеры для того, чтобы во время загрузки и выгрузки не нарушать гидравлический и тепловой режимы. Шлюзовая камера со стороны разгрузки одновременно является камерой для охлаждения вагонеток с катализатором.

Охлаждение производится воздухом, который нагнетается и отсасывается вентилятором, установленным на площадке над печью.

Вагонетки по печи проталкиваются цепным толкателем, а выводятся из камеры охлаждения цепным выталкивателем.

Явно выраженных температурных зон в печи нет. Так как температура теплоносителя снижается по мере движения в печи, то можно условно печь по ходу движения теплоносителя разделить на зону прокалки, зону предварительного нагрева до температуры прокалки 450 °С и зону сушки, где происходит удаление влаги из катализатора до конечной влажности 1%. Термическая обработка длится 21 ч. Производительность печи 170 кг/ч.

Тепловая работа печи осуществляется следующим образом: теплоноситель, подготовленный в циклонной топке сжиганием газовоздушной смеси и доведенный до 450 °С рециркуляционным воздухом,

Таблица 30

Техническая характеристика шахтной печи для термообработки катализаторов ИК-1 и ИК-2

Показатель	Расчетные величины				
	I зона	II зона	III зона прокалки	IV зона	V зона
	нагрев			охлаждение	
Начальная и конечная влажность, %	$W_н = 30$			$W_к = 1$	
Количество испаряемой влаги, кг/ч	58				
Температура теплоносителя на входе в зону, °С	250	550	550	20	20
Температура теплоносителя на выходе из зоны, °С	220	500	500	40	40
Температура катализатора на входе в зону, °С	60	200	500	500	300
Температура катализатора на выходе из зоны, °С	200	500	500	300	50
Сопротивление слоя в направлении движения слоя, Па	170	50	30	20	20
Материал корпуса печи	Сталь Ст. 3	Сталь Х17Н13М2Т	Сталь Х17Н13М2Т	Сталь Ст. 3	Сталь Ст. 3
Материал короба-туннеля	Сталь Х18Н10Т	Сталь Х17Н13М2Т	Сталь Х17Н13М2Т	Сталь Х18Н10Т	Сталь Х18Н10Т
Время пребывания катализатора в зоне, ч	2	1	2	1	1
Насыпная масса, т/м³	0,7—0,8				
Размер катализатора, мм	$D = 5$ $l = 5—20$				

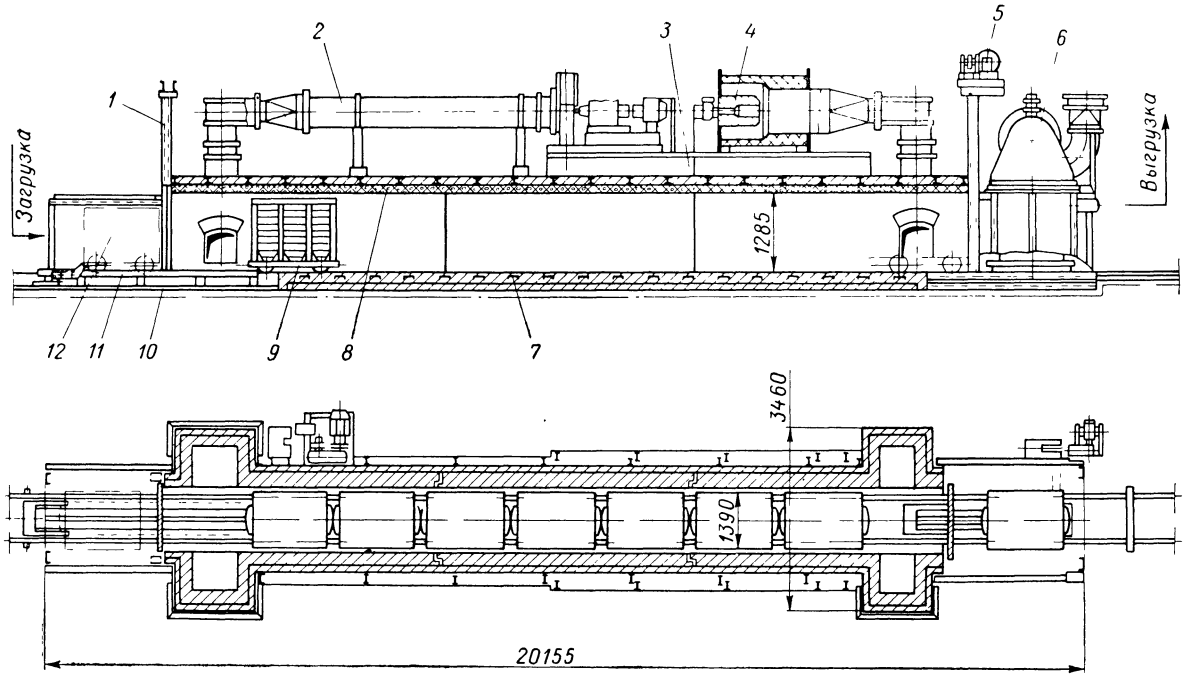


Рис. 70. Печь туннельная производства катализаторов для конверсии смеси углерода:

1 — каркас печи; *2* — рециркуляционный трубопровод; *3* — площадка; *4* — топка; *5* — механизм для подъема двери; *6* — камера охлаждения; *7* — рельсовый путь; *8* — балка; *9* — тележка; *10* — дверь; *11* — цепной толкатель; *12* — камера загрузки.

имеющим температуру 200—250 °С, подается по двум вертикальным каналам. Вертикальные каналы расположены по обе стороны в конце печи и выходят в рабочую камеру на уровне полок-вагонеток. Теплоноситель, пройдя печь через вагонетки, отсасывается вентилятором также по двум вертикальным каналам, часть его подается в топку на рециркуляцию, а часть выбрасывается в атмосферу. Конструкция топки приведена на стр. 268.

Печи производства никелевых катализаторов. *Печь туннельная ПТГ-1* предназначена для прокалки таблеток-носителей катализатора ГИАП-11 из немолотого глинозема. Этот носитель используется для создания никелевых катализаторов типа ГИАП-11.

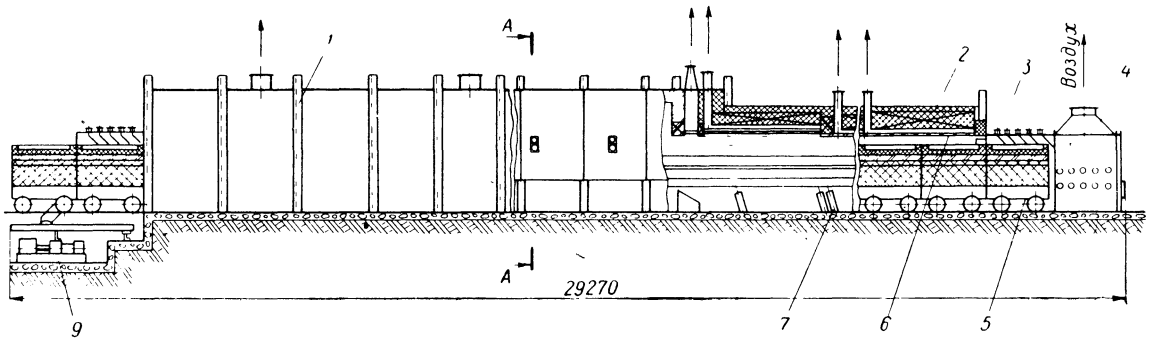
Конструкция печи ПТГ-1 приведена на рис. 71. Печь представляет собой туннель прямоугольной формы с арочным сводом. Рабочее пространство печи в зоне сушки футеруется шамотным кирпичом. Зона нагрева и прокалки футеруется высокоогнеупорным магнезитохромитовым кирпичом. Свод над зоной нагрева и прокалки не теплоизолирован. Боковые стены печи во всех зонах ниже рабочего пространства до фундамента футеруются шамотом классов А, Б или красным кирпичом. В зоне охлаждения футеровка с внутренней стороны облицована карборундовыми плитами, образующими каналы (муфели), по которым циркулирует воздух, охлаждающий зону. Футеровка печи заключена в металлический каркас из продольного проката. Для обеспечения безопасного обслуживания печи, футеровка с наружной стороны в зоне нагрева и прокалки экранируется листовым железом, что обеспечивает температуру на его поверхности 30 °С.

Футеровка печи и каркас устанавливаются на монолитный бетонный фундамент. На фундаменте печи укреплены рельсовые пути, по которым передвигаются вагонетки, загруженные таблетками носителя. Вагонетка состоит из четырех катков, несущей рамы, воспринимающей усилия при проталкивании поезда и платформы. Защита платформы от действия высоких температур осуществляется огнеупорной футеровкой из шамота класса А, а сверху высокоглиноземистым кирпичом. Перемещение поезда из 26 вагонеток осуществляется с помощью толкателя. Рабочий ход винтового толкателя равен длине вагонетки. Время толкания вагонетки в рабочем ходе составляет 56 мин. Время обратного холостого хода за следующей вагонеткой равно 4 мин.

Рабочее пространство печи от подвагонеточного отделена песочным затвором, а стыки вагонеток уплотняются асбестовыми шнурами. Охлаждение металлических конструкций вагонеток производится воздухом, подаваемым вентилятором, и отбирается в начале зоны охлаждения.

Туннельную печь ПТГ-1 можно разделить на шесть температурных зон: сушки, нагрева, прокалки и зоны охлаждения.

В зоне сушки происходит удаление остаточной влаги за счет тепла отходящих дымовых газов из зоны нагрева, температура в этих зонах 200 °С. Дымовые газы отбираются из зоны сушки через



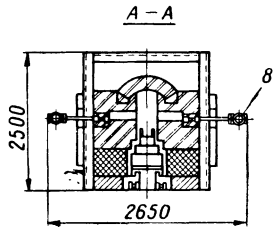


Рис. 71. Печь туннельная производства никелевых катализаторов (ПТГ-1):

1 — каркас; *2* — футеровка; *3* — шлюз; *4* — вытяжная камера; *5* — вагонетка; *6* — муфель; *7* — воздуховод; *8* — горелка; *9* — толкатель.

6 отверстий на своде печи этой зоны. Во избежание перегрева таблеток носителя от теплового излучения вагонеток и футеровки печи, зоны нагрева в конце этой зоны имеют экранирующий пережимной свод. Общее время пребывания носителя в зоне сушки составляет 4 ч.

В зоне нагрева высушенные таблетки носителя постепенно нагреваются от 200 до 1740 °С за счет тепла отходящих дымовых газов из зоны прокалки и за счет тепла от сжигания смеси природного газа и воздуха, обогащенного кислородом, приготовленной в четырех горелках ГНП-2. Отбор дымовых газов производится через 12 отверстий на своде печи в данной зоне. Время нагрева таблеток носителя составляет 8 ч.

В зоне прокалки в течение 4 ч выдерживают таблетки носителя при 1800 °С. Высокая температура в печи создается дымовыми газами, получаемыми от сжигания смеси природного газа с воздухом, обогащенным кислородом. Смесь предварительно приготовляется в горелках ГНП-2 и сжигается в горелочной туннеле. Всего горелок в зоне прокалки на боковых стенках печи установлено восемь; между ними одинаковое расстояние. Обогащение воздуха кислородом, поступающим на горение, вызвано необходимостью иметь высокую температуру продуктов горения.

Охлаждение таблеток носителя осуществляется в трех зонах:

I зона — это охлаждение в высокотемпературной зоне в результате поглощения теплового излучения от вагонеток футеровкой стен и свода и передачи тепла в атмосферу цеха теплопроводностью футеровочного материала из-за разности температур между внутренней и наружной поверхностью печи. В этой зоне снижается температура таблеток носителя на 150—200 °С.

II зона — это охлаждение таблеток носителя за счет отвода излучаемого тепла воздухом, проходящим через керамические муфели. Для улучшения отвода тепла муфели разделены по длине на три участка. Температура таблеток носителя снижается в этой зоне за 6 ч до 300 °С.

III зона — это окончательное и интенсивное охлаждение таблеток носителя в шлюзовой камере в конце печи воздухом, нагнетаемым вентилятором через отверстия в металлической стенке шлюзовой камеры. Подаваемый воздух обдувает вагонетки с таблетками носителя катализатора и снижает его температуру за 2 ч до 50 °С. Нагретый воздух отводится через верх шлюзовой камеры.

Продолжительность термообработки таблеток носителя катализатора составляет 26 ч, а производительность печи 500 кг/ч.

Герметизация печи создается вагонетками, аэродинамическим уплотнением и пережимным сводом.

Количество воздуха, подаваемое на охлаждение, и отсос его регулируется специальными задвижками на трубопроводах. Регулирование температуры дымовых газов, выходящих из печи, осуществляется подсосом воздуха через отверстия в футеровке печи. Количество подсасываемого воздуха регулируется шиберами, установленными в каналах футеровки печи.

Методика расчета шахтной четырехзонной печи. Расчетом определяется количество теплоносителя, подаваемого в зону, которое необходимо подготовить в отдельностоящей топке, количество отходящих газов для расчета и выбора тягодутьевого оборудования пылеочистных устройств и дымовой трубы. Расчетом определяется количество воздуха, подаваемого на охлаждение материала, необходимого для расчета и выбора тягодутьевого оборудования. Расчетом определяется также сопротивление слоя материала, которое проходит теплоноситель или охлаждаемый воздух. Полученные значения сопротивления слоя пылеочистных установок трубопроводов необходимы для выбора тягодутьевого оборудования и определения мощности электродвигателя, обслуживающего это оборудование.

Исходные данные, которые необходимы для составления материального и теплового баланса, а также для выполнения гидравлических расчетов следующие:

Количество продукта, поступающего в печь	$G_{вл}$, кг/ч
Теплоемкость продукта	$G_{пр.в}$, кДж/(кг · °С)
Насыпная масса сухого продукта	γ, кг/м^3
Начальная влажность продукта	ω_1, %
Конечная влажность продукта	ω_2, %
Гранулометрический состав сухого продукта	мм
Время термической обработки	τ, ч

Температурный режим зоны сушки:

Температура продукта, поступающего в зону	t_1, °С
Температура продукта, покидающего зону	t_2, °С
Температура дымовых газов на входе в зону	t_3, °С
Время пребывания продукта в зоне	τ_1, ч

Температурный режим зоны нагрева:

Температура продукта, поступающего в зону	t'_1, °С
Температура продукта, покидающего зону	t'_2, °С
Температура дымовых газов на входе в зону	t'_3, °С
Температура дымовых газов на выходе из зоны	t'_4 °С
Время пребывания продукта в зоне	τ_2, ч

Температурный режим зоны прокалки:

Температура продукта, поступающего в зону	t''_1, °С
Температура продукта, поступающего в зону	t''_2, °С
Температура дымовых газов на входе в зону	t''_3, °С
Температура дымовых газов на выходе из зоны	t''_4, °С
Время пребывания продукта в зоне	τ_3, ч

Температурный режим зоны охлаждения:

Температура продукта, поступающего в зону	t'''_1, °С
Температура продукта, покидающего зону	t'''_2, °С
Температура охлаждающего воздуха на входе в зону	t'''_3, °С
Температура нагретого воздуха на выходе из зоны	t'''_4, °С
Время пребывания продукта в зоне	τ_4, ч

Тепловой баланс зоны сушки:

Тепловой баланс зоны сушки составляется на основе равенства поступающего количества тепла в зону и расходуемого тепла:

$$Q_1 = 1.1\,(Q_2 + Q_3 + Q_4)$$

где Q_1 — количество тепла, подводимого дымовыми газами, Вт; Q_2 — количество тепла, затрачиваемое на нагревание продукта до t_2, Вт; Q_3 — количество тепла, уносимое из зоны с дымовыми газами, Вт; Q_4 — количество тепла, затрачиваемое на испарение и перегрев водяных паров, Вт; 1,1 — коэффициент, учитывающий потери тепла в окружающую среду.

Подставляя развернутые значения количества тепла Q, получим следующее обобщенное уравнение для определения количества подводимых дымовых газов:

$$V_г^0 = \frac{1{,}1\,[G_{вл} c_{пр}\,(t_2 - t_1) + W_1\,(i_{вл} - t_1)]}{c_1 t_3 - 1{,}1 c_2 t_4}$$

где $V_г^0$ — количество дымовых газов, которое необходимо подводить в зону, м³/ч; W_1 — количество влаги удаляемой из зоны сушки, кг/ч; $i_{вл}$ — энтальпия водяных паров при t_4 и $P = 0{,}1$ МПа, кДж/кг; c_1 — теплоемкость дымовых газов на входе в зону, кДж/(м³ · °С); c_2 — теплоемкость дымовых газов на выходе из зоны, кДж/(м³ · °С).

Действительное количество дымовых газов на выходе из зоны равно:

$$V_г' = V_г \frac{273 + t_4}{273} + W v_1$$

где v_1 — удельный объем водяных паров при t_4 и $P = 0{,}1$ МПа.

Тепловой баланс зоны нагрева.

Уравнение теплового баланса этой зоны имеет следующий вид:

$$Q_1' = 1{,}1\,(Q_2' + Q_3')$$

где Q_1' — количество тепла, подводимое дымовыми газами, Вт; Q_2' — количество тепла, затрачиваемое на нагревание продукта до t_2', Вт; Q_3' — количество тепла, уносимое из зоны с дымовыми газами, Вт.

Уравнение для определения количества дымовых газов, которое необходимо подводить в зону, имеет следующий развернутый вид

$$V_{II_г}^0 = \frac{1{,}1\,[G_{сух} c_{пр}\,(t_2' - t_1')]}{c_3\,(t_4' - t_3') - 1{,}1 c_2 t_4'}$$

где $V_{II_г}^0$ — количество дымовых газов, которое необходимо подводить в зону, м³/ч; $Q_{сух}$ — количество сухого продукта, кг/ч; c_3 — теплоемкость дымовых газов, кДж/(кг · °С).

Действительное количество дымовых газов на выходе из печи

$$V_{II_г}' = V_{II_г}^0 \frac{273 + t_4'}{273}$$

Тепловой баланс зоны прокалки составляется аналогично зоне нагрева.

Тепловой баланс зоны охлаждения составляется на основе равенства поступающего с продуктом тепла и количеством тепла, отводимым охлаждающим воздухом:

$$Q''' = 1{,}1\,(Q_2''' + Q_3''')$$

где Q''' — количество тепла, которое необходимо отнять у продукта, Вт; Q_2''' — количество тепла, уносимое с материалом из зоны охлаждения, Вт; Q_3''' — количество тепла, уносимое охлаждающим воздухом, Вт.

Развернутое уравнение теплового баланса будет иметь следующий вид:

$$V_{\text{возд}} = \frac{G_{\text{сух}} c_{\text{пр}} (t_1''' - 1{,}1 t_2''')}{1{,}1 c_{\text{возд}} (t_4''' - t_3''')}$$

где $V_{\text{возд}}$ — количество воздуха, подаваемое на охлаждение продукта, м³/ч; $c_{\text{возд}}$ — теплоемкость воздуха, кДж/(м³ · °С).

Действительный объем отходящего нагретого воздуха равен:

$$V'_{\text{возд}} = V_{\text{возд}} \frac{273 + t_3'''}{273}$$

В случае, если печь имеет большее количество зон, методика расчета остается неизменной.

Гидравлические расчеты проводят для определения гидравлического сопротивления слоя продукта в зоне печи.

Гидравлическое сопротивление зоны и продольного прохода дымовых газов рассчитывают по формуле:

$$\Delta P = 10 k H_{\text{сл}} W^a$$

где ΔP — сопротивление зоны, Па; k — коэффициент, принимаемый по опытным данным для зоны сушки равным 1,2, для других зон 1,42; $H_{\text{сл}}$ — высота зоны, мм; W — скорость дымовых газов в слое; a — показатель степени, принимаемый по опытным данным для зоны сушки равным 1,18, для других зон 1,45.

Скорость движения продукта в зоне $W_{\text{м}}$ определяют из времени его пребывания в зоне:

$$W_{\text{м}} = H_{\text{сл}} / \tau$$

Скорость теплоносителя на выходе из короба-туннеля находят по формуле:

$$W_{\text{вых}} = V'_{\text{г}} / 3600 n m f$$

где n — число рабочих рядов коробов-туннелей в зоне; m — число коробов-туннелей в ряду; f — площадь сечения короба-туннеля, м².

Скорость теплоносителя на входе в отводящий короб-туннель определяют по формуле:

$$W_{\text{вх}} = \frac{V_{\text{г}} \frac{273 + t_4}{273}}{3600 n m f_1}$$

где f_1 — площадь сечения короба-туннеля, мм.

Скорость движения теплоносителя в слое рассчитывают по формуле:

$$W_{\text{сл}} = \frac{V_{\text{г}}^0 + \frac{273 + t_{\text{ср}}}{273}}{3600 f_3 n b}$$

где f_3 — площадь сечения отводящего короба-туннеля, м²; b — число промежутков между коробами-туннелями.

По формулам, приведенным выше, определяют гидравлическое сопротивление зоны и продольный проход теплоносителя и охлаждающего воздуха.

Печи с вращающимся барабаном

Классификация печей. Вращающиеся печи в химической промышленности нашли самое широкое применение. В них можно проводить как непрерывные, так и периодические термохимические процессы обжига, восстановление и окисление различных материалов при высокой температуре. Хорошие условия теплопередачи от раскален-

ных газов к обрабатываемому материалу как непосредственно, так и через корпус печи или керамические муфели являются преимуществом вращающихся печей. Перемешивание материалов в процессе термообработки без специальных механических устройств, только за счет вращения, выгодно отличают вращающиеся печи от печей других типов. Использование газообразного и жидкого топлива, а также электронагрева делают вращающиеся печи универсальными. Простота в эксплуатации, длительный межремонтный срок делают их экономически выгодными и практически целесообразными.

Использование движущегося слоя в процессе взаимодействия систем газ — твердое вещество уменьшает возможность существования застойных зон; кроме того, относительное движение частиц в таком слое создает условия для взаимодействия газа с большей, чем при неподвижном слое, поверхностью твердой фазы.

Печи с вращающимся барабаном можно разделить на следующие виды:

по назначению — на печи общего назначения, в которых можно проводить различные термохимические реакции, и на печи специального назначения, в которых можно проводить только рассчитанный процесс;

по способу нагрева — на печи прямого нагрева, где происходит прямой контакт дымовых газов и воздуха с материалом, и на печи непрямого нагрева, где отсутствует контакт между газом и материалом;

по организации проводимого технологического процесса в печи — на непрерывные и периодические;

по виду получаемого тепла — на топливные печи или печи с электрообогревом;

по направлению движения газов и материала — на прямоточные и противоточные и т. д.

Печи с вращающимся барабаном с прямым нагревом общего назначения предназначены для проведения тепловой обработки различных материалов, допускающих прямой контакт с дымовыми газами.

Печи двухопорные (рис. 72), изготовляемые длиной барабана до 22 м и диаметром до 2,2 м, рассчитаны на поточное и противоточное движение теплоносителя и обрабатываемого материала. Основные размеры их приведены в табл. 31.

Печи двух-, трех- и четырехопорные (рис. 73, 74) рассчитаны на противоточное движение теплоносителя и обрабатываемого материала. Основные размеры их приведены в табл. 32.

Печь с вращающимся барабаном непрерывного действия представляет собой цилиндрический сварной корпус, на котором при помощи башмаков закреплены бандажи; корпус (барабан) печи опирается бандажами на опорные ролики соответствующих станций (опорной, опорной с упором, упорно-опорной).

Внутри барабан футеруется огне- или кислотоупорным кирпичом, марка которого выбирается в зависимости от теплового режима

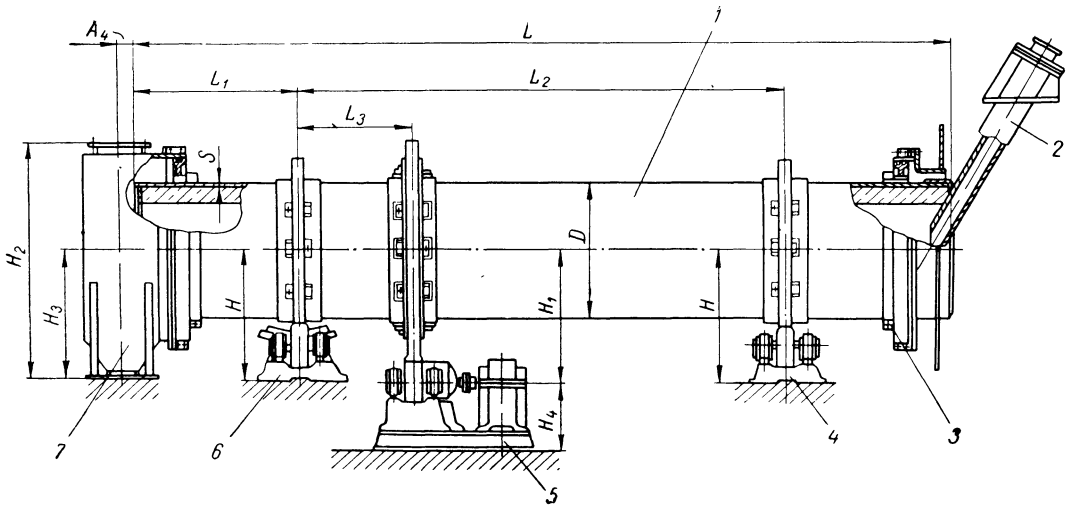


Рис. 72. Печь с вращающимся барабаном:

1 — барабан; *2* — течка; *3* — уплотнительное кольцо; *4* — опорная станция; *5* — механизм для вращения барабана; *6* — опорно-упорная станция; *7* — короб для разгрузки.

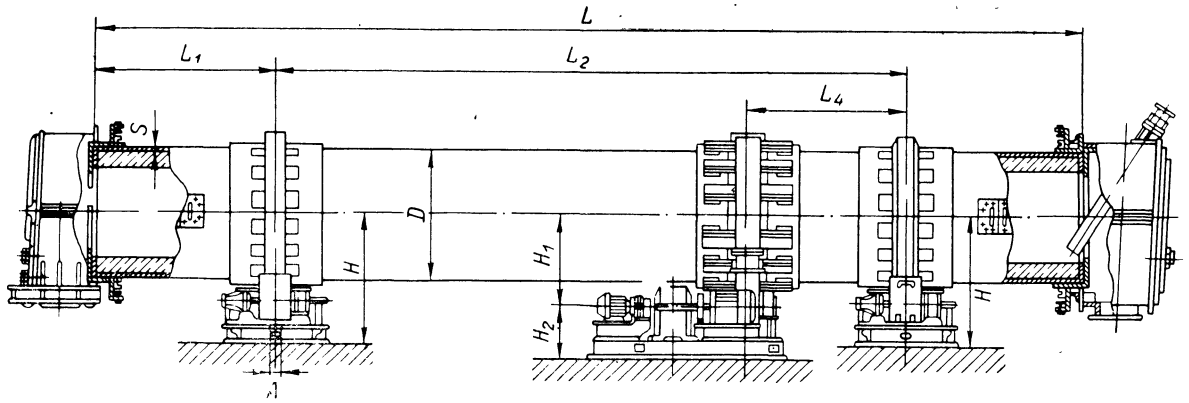


Рис. 73. Печь с вращающимся барабаном с откатной головкой.

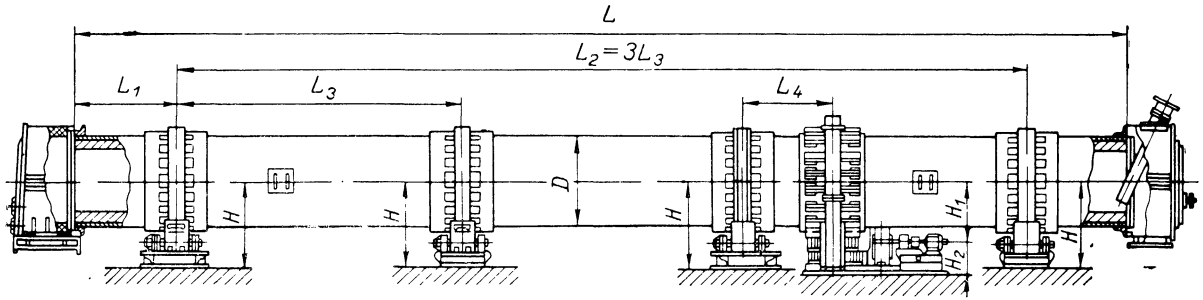


Рис. 74. Печь с вращающимся барабаном с откатной головкой четырехопорная.

Таблица 31

Параметры и основные размеры (в мм) поточных печей с правым и левым расположением привода

D	L	Максимальная нагрузка на опорную станцию, кН	L_1	L_2	L_3	A	H	H_1	H_2	H_3	S	Масса, т
1000	8 000	100	1650	4 700	800	100	967	715	1670	910	8	5,3
	12 000	100	2500	7 000								6,1
	16 000	100	3350	9 300								6,9
1200	12 000	160	2500	7 000	900	150	1180	835	1915	1042	10	8,4
	16 000	160	3350	9 300								9,6
1600	12 000	250	2500	7 000	1100	250	1503	1070	2455	1368	12	15,4
	16 000	250	3350	9 300								17,3
	20 000	250	4150	11 700								19,2
2200	18 000	400	3750	10 500	400	1942	1370	3300	1885	—	16	35,2
	22 000	400	5150	11 700								36,9
	25 000	630	5000	15 000								—

Таблица 32

Параметры и основные размеры (в мм) двух-, трех- и четырехопорных печей с правым и левым расположением привода

D	L	Максимальная нагрузка на опорную станцию, кН	L_1	L_2	L_3	L_4	A	H	H_1	S	Число опор	Масса, т
2200	35 000	800	4500	26 000	13 000	3000	25	2422	1432	16	3	115
2500	20 000	630	4150	11 700	—	—	22	2358	1495	—	—	90
	30 000	1000	5000	20 000	—	—	—	—	—		2	—
	40 000	1250	5000	30 000	15 000	3000	28	2555	1495	20	—	—
2800	35 000	1000	4500	26 000	13 000	—	—	—	—	—	3	—
	45 000	1250	5500	34 000	17 000	—	29	2731	1792	20	—	180
	55 000	1600	5000	45 000	15 000	3000	26	2671	1792	20	4	210
3000	35 000	1250	4500	26 000	13 000	—	30	2826	1912	22	3	181
	45 000	1600	5500	34 000	17 000	—	39	2886	1912	22	3	201
	60 000	2000	6000	48 000	16 000	—	—	—	—	—	4	—
3200	50 000	1600	5500	39 000	19 000	3000	35	3098	1985	26	4	262
	60 000	2000	6000	48 000	16 000	—	—	—	—	—	—	—
3500	60 000	1600	6000	48 000	16 000	3000	29	3271	2149	26	4	315
	70 000	2000	5000	60 000	20 000	—	—	—	—	—	—	—

печи и технологических процессов, проводимых в них. Причем перечисленные факторы, а также и диаметр барабана определяют толщину футеровки. Для закрепления футеровки в барабане к его торцам приваривают так называемые кольцевые пороги.

Для перемещения материала в сторону выгрузки печь устанавливают под небольшим углом к горизонту.

Привод барабана печи индивидуальный, смонтирован на отдельной сварной раме и состоит из электродвигателя, редуктора, открытой венцовой передачи. Кроме того, привод имеет вспомогательные (резервные) электродвигатель и редуктор сравнительно малой мощности. Скорость вращения барабана печи регулируют изменением числа оборотов электродвигателя.

Печи оборудованы отдельно стоящими топками, конструкция которых зависит от вида топлива, или откатными головками. Откатная головка печи (рис. 75), одновременно служащая топочной камерой, монтируется на четырехколесной тележке, установленной на рельсах. Корпус головки изготовляют из листовой стали и футеруют внутри огнеупорным кирпичом.

Откатную головку присоединяют к корпусу барабана при помощи специальных уплотняющих устройств, обеспечивающих надлежащую герметичность этого соединения. При ремонте и смене футеровки головку отсоединяют от барабана и отодвигают по рельсам на требуемое расстояние. В нижней части головки имеется отверстие и патрубок для выпуска продукции.

С противоположного торца печь примыкает к пыльной камере, в которой улавливаются частицы материала, уносимые из печи. К этой камере присоединен дымоход, через который отводятся продукты сгорания и реакционные газы.

Печи по способу нагрева материала в реторте подразделяют на электрические и на газовые. При электрическом нагреве реторта может вращаться вместе с электрическими нагревателями, или, как при газовом нагреве, цилиндрическая реторта вращается внутри неподвижной нагревательной камеры. Нагревательную камеру футеруют огнеупорным и теплоизоляционным кирпичом. Реторта проходит через всю нагревательную камеру, а оба конца реторты выходят за его пределы. На этих концах расположены бандажи и зубчатый венец от приводного механизма.

В тех случаях, когда необходимо охладить готовый продукт перед выгрузкой из печи, разгрузочный конец реторты снабжают дополнительной насадкой, наружная сторона которой охлаждается струями воды. Горячие газы удаляются из нагревательной камеры через вытяжную трубу.

Рабочие температуры в печах с непрямым нагревом ограничены по конструктивным соображениям и обычно составляют 425 С для углеродистой и 650 °С для нержавеющей стали. Использование специальных сплавов позволяет увеличить рабочую температуру до 1100 °С.

Чтобы предотвратить скольжение твердого материала по гладкой внутренней поверхности цилиндра, часто приваривают к внутрен-

ним стенкам продольные металлические полосы для подъема материала. Эти полосы обычно не заставляют материал рассыпаться сплошной завесой по всему сечению, а только предотвращают скольжение и действуют так, что слой материала переворачивается и при

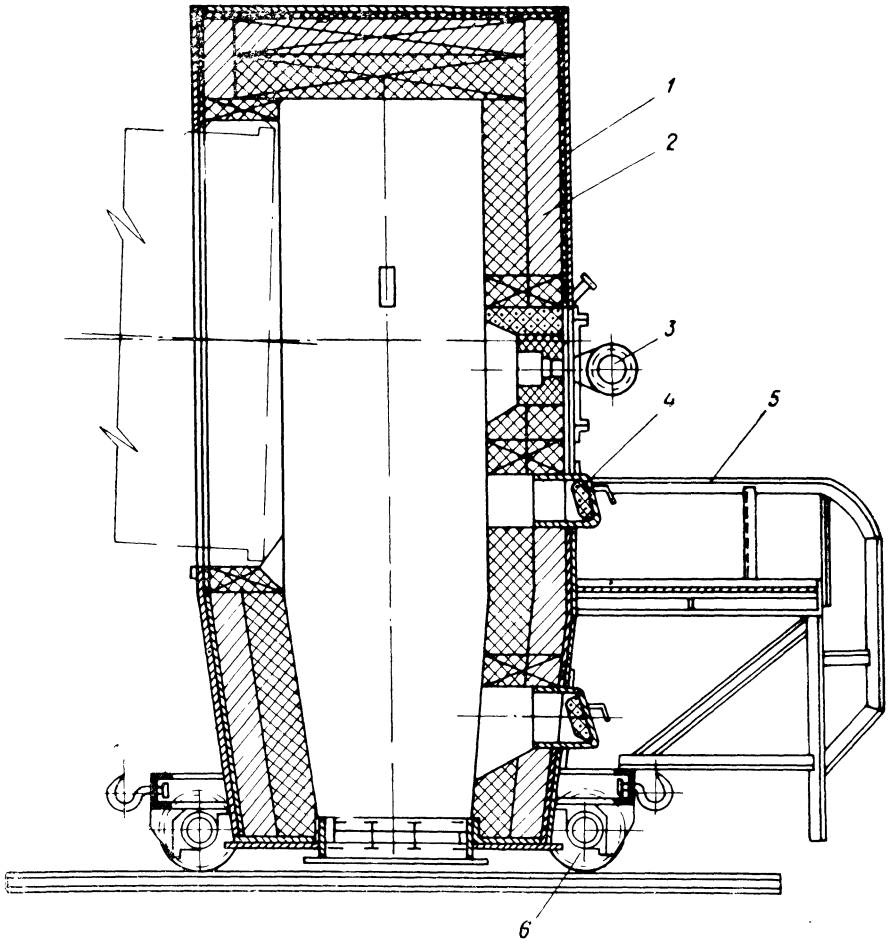


Рис. 75. Откатная головка:
1 — кожух; *2* — футеровка; *3* — горелка; *4* — лаз; *5* — площадка; *6* — лоток.

этом постоянно обновляется поверхность для тепло- и массопереноса. Для предупреждения налипания материала на внутреннюю поверхность цилиндра иногда используют тяжелые цепи. Чтобы цепи могли поворачиваться, не запутываясь звеньями, их укрепляют на обоих концах аппарата шарнирно. Цепи должны проходить через слой обрабатываемого материала и очищать стенки от налипшей твердой фазы. В этом случае нет необходимости использовать подъемные

полосы (внутреннюю насадку), так как перемешивание материала также происходит за счет движения цепей.

Для обеспечения равномерного нагрева при газовом топливе горелки располагают под ретортой.

Для обеспечения герметичности вращающиеся печи имеют уплотняющее устройство; последние бывают трех типов: лабиринтное, контактное и аэродинамическое. Контактные уплотняющие устройства герметизируют печь двумя трущимися точеными кольцами, из которых одно закрепляется на барабане печи, другое на пылеосадительной камере и откатной головке.

Аэродинамическое уплотнение вращающихся печей. В основу конструкции аэродинамического уплотнения (рис. 76) заложено создание необходимого противодавления путем удара струи воздуха на наружную поверхность вращающегося барабана на его концах (рис. 77). Потоки воздуха из полостей *а* и *б* направляются под углом и с определенной скоростью на поверхность барабана для создания давления и высасывания через полость *с*. Примерное распределение давлений в ограждаемой конструкции показано на эпюрах рис. 78. Подачу и отбор воздуха производят одним вентилятором, работающим по замкнутому циклу. Подачу воздуха через полость *а* и *б* проводят раздельно, и ее регулировка зависит от давления газов в ограждаемой области. При положительном давлении газов основной ограждающий поток воздуха идет через полость *б*, а через полость *а* подается поток воздуха, преграждающий его от выбивания. В полости *с* поддерживается давление около нуля. При разрежении в ограждающей области основной поток проходит через полость *а*, а через полость *б* подается преграждающий поток. В полости *с* поддерживается разрежение, соответствующее разрежению в ограждаемой области.

Давление газов в ограждаемой области, особенно при больших диаметрах барабана, неодинаково из-за высокой температуры. Перепад давления для барабана диаметром 3 м составляет $\pm$ 30 Па. Это обстоятельство требует секционированной подачи и отбора воздуха по периметру барабана, причем настройку каждой секции производят на давление газов, соответствующее положению секции.

Среднюю скорость воздуха $w_{ср}$, необходимую для создания требуемого давления $P_{ср}$, определяют по формуле:

$$P_{ср} = 0{,}09\rho w_{ср}^2 (\sin\alpha)^{1{,}86}$$

где ρ — плотность воздуха, кг/м^3.

Формула справедлива для углов α = 10—40° для круглой струи. При расчете давления, создаваемого струей, необходимо руководствоваться этой формулой.

Необходимая средняя скорость истечения воздуха зависит (рис. 79) от угла наклона центра потока $O - O$, который должен быть таким, чтобы угол α, образующийся крайней наружной струей потока воздуха, был не более 50° и не вызывал отраженного потока в обратную сторону; угол раскрытия струи $\sim$ 22° или на сторону 11° и тогда угол α будет равен 40°.

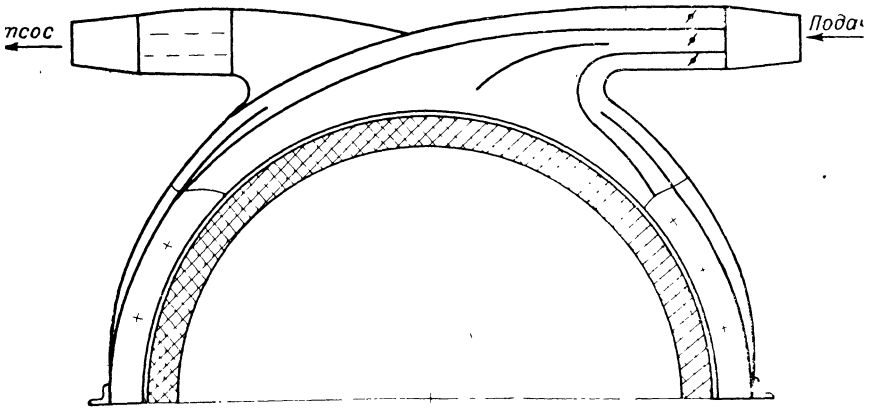


Рис. 76. Аэродинамическое уплотнение.

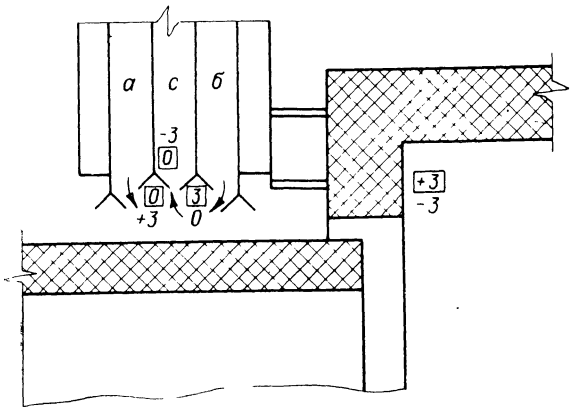


Рис. 77. Принципиальная схема аэродинамического уплотнения.

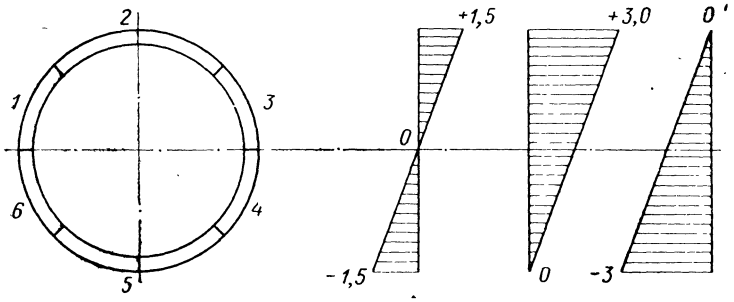


Рис. 78. Схема распределения давления в ограждаемой конструкции.

Размер щели следует принимать минимальным (10—15 мм) в зависимости от наружного диаметра барабана и допускаемого биения.

Длину струи рассчитывают по формуле:

$$l = K/\sin\alpha = K/0{,}71$$

где K — расстояние от верхней кромки выходной щели до поверхности барабана, мм.

Величину затухания струи от места выхода до удара определяют по графику затопленной струи:

$$\frac{w}{w_0} = f\left(\frac{l}{\delta}\right)$$

где w — средняя скорость воздуха в месте удара, м/с; w_0 — средняя скорость выхода, м/с; δ — толщина струи, мм.

При небольших размерах l во избежание больших расходов воздуха следует принимать ≈ 10 мм.

При применении уголков 50×50 $l \approx 80$ мм, $l/\delta = 80/10 = 8$, отношение $w/w_0 \approx 0{,}7$ — это для центральной струи, для всего потока (средний) $\cong 0{,}5$, но, принимая во внимание биение барабана и увеличение при этом длины его l, следует для подсчета необходимого объема подаваемого воздуха скорость истечения принимать среднюю по периметру уплотнения $w_{уд}^{ср}$. Расчеты скоростей воздуха необходимо выполнять для минимального и максимального давления в ограждаемой полости (в случае давления вверху и внизу одного знака: + или —). В случае, если в центре сечения барабана $P_{ср} = 0$, то его значение необходимо принимать по наибольшему давлению.

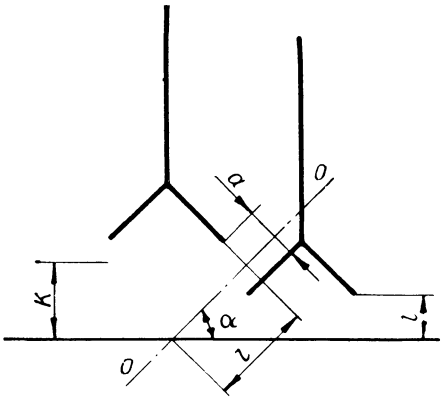


Рис. 79. Схема для определения средней скорости истечения воздуха.

Ввиду неточностей монтажа, биения концов барабана, где располагаются уплотнения, возможно частичное выбивание или подсос воздуха в систему. Поэтому рекомендуется на всасывающей линии вентилятора предусматривать патрубок с заслонкой для компенсации объема теряемого воздуха.

Как уже указывалось, вследствие различного давления по высоте в ограждаемой полости необходима различная настройка секций.

Количество секций на уплотнение можно рекомендовать: а) при диаметре барабана до 2 м — две секции (нижняя и верхняя); б) при диаметре более 2 м шесть секций (три наверху и три внизу).

Распределительные короба должны обеспечивать равномерное распределение воздуха по всей щели — для этого они могут быть

выполнены или по принципу короба равного сопротивления, либо иметь сечения короба, превышающие площадь щели в 3 раза.

Полость отсоса воздуха выполняется аналогично системе подвода воздуха.

Надежность работы уплотняющих устройств имеет большое значение для поддержания заданного режима работы печи и влияет на ее технико-экономические показатели.

Подсос воздуха в месте соединения печи с откатной головкой вызывает дополнительный расход топлива, увеличивает нагрузку на дымосос, а в случае необходимости поддержания в зоне печи восстановительной среды может сказаться и на качестве продукции.

Печи с вращающимся барабаном с непрямым нагревом. Печи с наружным нагревом барабана (топливные). Для тепловой обработки материалов (в условиях герметизации) в окислительной, инертной или восстановительной атмосфере; а также в тех случаях, когда не допускается соприкосновение материала с дымовыми газами и воздухом, используются печи с вращающимся барабаном, помещенным внутрь электрической или пламенной нагревательной камеры. Конструкция печи с непрямым нагревом приведена на рис. 13.

Печи с наружным нагревом барабана (электрические). *Печи с вращающимся барабаном типа СБЗ/С.* Электропечи сопротивления непрерывного действия предназначены для тепловой обработки и проведения процессов восстановления сыпучих порошкообразных материалов, которые не комкуются и не прилипают к стенкам герметичного вращающегося барабана во время нагрева в нейтральной или восстановительной атмосфере.

На рис. 80 приведена конструкция электропечи типа СБЗ-4.40/9С исп. М02 *.

Основными узлами электропечи являются: нагревательная камера, барабан, загрузочные и разгрузочные механизмы.

Нагревательная камера состоит из стального сварного каркаса, футеровки, свода и нагревателей.

Футеровка камеры для электропечей, имеющих 600 и 350 °С, выполнена двухслойной: огнеупорный слой из шамота-легковеса, теплоизоляционный из диатомового, а для электропечей, имеющих температуру 900 °С, — однослойной, из шамота-легковеса или шамота-ультралегковеса.

Для удобства обслуживания и ремонта свод нагревательной камеры сделан съемным. Кладка свода арочная; огнеупорная часть выполнена из шамота-легковеса, теплоизоляционная — из шамота-ультралегковеса. Каждая камера по длине имеет три тепловые зоны. В печах СБЗ/С нагреватели зигзагообразной формы, изготовленные из нихромовой проволоки, монтируются на штырях, закрепленных

---

* Типовое обозначение расшифровывается следующим образом: С — нагрев сопротивления; Б — барабанная электропечь; З — защитная атмосфера; 4 — наружный диаметр барабана, дм; 40 — длина рабочего пространства в камере нагрева, дм; 9 — рабочая температура в сотнях °С; С — для сыпучих материалов; М — модификация; 02 — порядковый номер модификации.

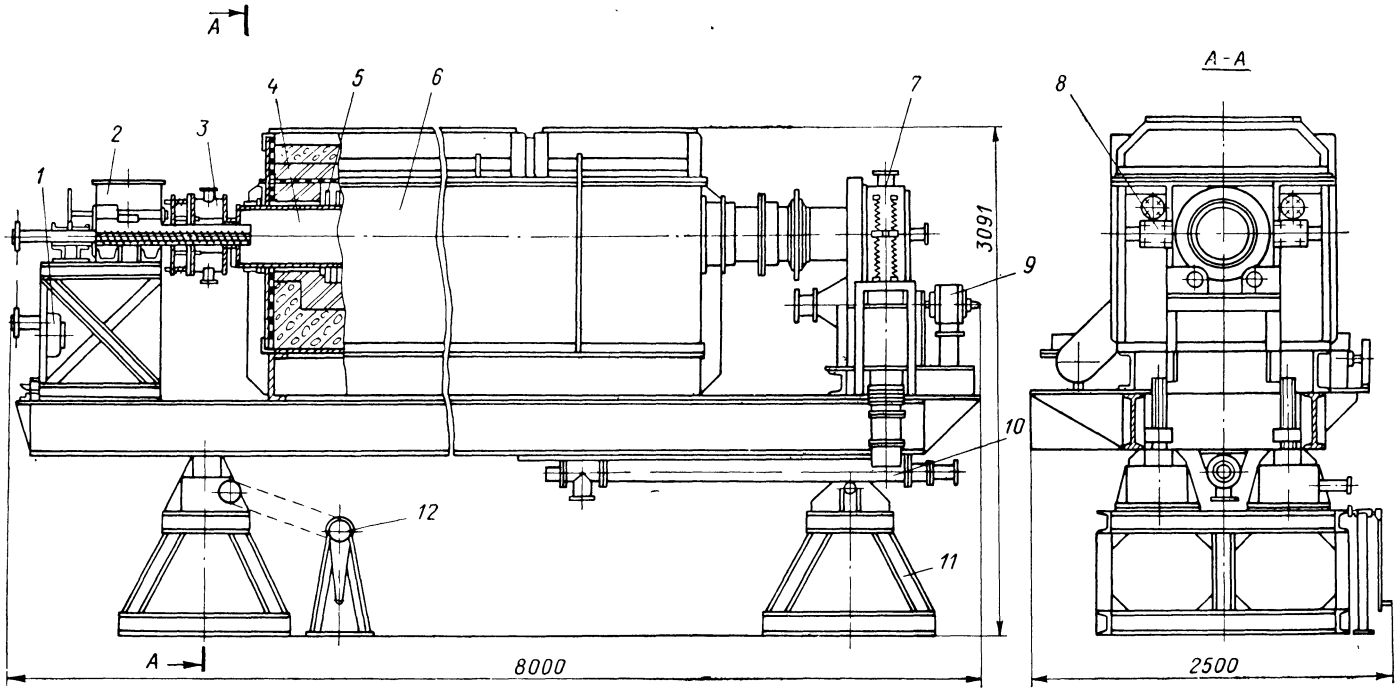


Рис. 80. Печь с вращающимся барабаном типа СБЗ-4,40/9С исп. МО2:

1 — привод механизма загрузки; *2* — механизм загрузки; *3* — загрузочная головка; *4* — барабан; *5* — нагреватель; *6* — нагревательная камера; *7* — разгрузочная головка; *8* — упорные ролики; *9* — привод барабана; *10* — механизм разгрузки; *11* — стойка с шарнирной опорой; *12* — домкрат.

в футеровке боковых стенок камеры. В электропечи СБЗ-10.63/9С нагреватели в виде выемных рамок из нихромовой ленты расположены на своде и поде. Устройство нагревательной камеры всех печей одинаково.

Барабаны электропечей выполняются из труб, изготовленных из сплавов Х18Н10Т для 600 °С и Х23Н18 для 900 °С; барабан электропечи СБЗ-6.63/3 5С исп. М02 сварной конструкции из листовой стали Х14Г14Н3Т. Для устранения прогиба барабана во время аварийных остановок привода механизма вращения в средней части нагревательной камеры электропечей на 900 °С установлена промежуточная цепная опора.

Механизм загрузки. В рабочее пространство печей всех типов продукт загружается шнековым питателем, в бункере которого находится разрыхлитель. После рыхления продукт подается в нижнюю часть бункера, где размещен шнек. Шнековая труба проходит в барабан через загрузочную головку с двумя патрубками: верхним — для установки «свечи» с электрозапальником, в котором происходит сжигание водорода или для присоединения к системе отсасывающей вентиляции и нижним — для сбора пыли и конденсата. Вращение механизмов питания осуществляется самостоятельным приводом.

Все узлы электропечей смонтированы на сварной раме, установленной на четырех опорах. Две опоры шарнирные, а остальные — домкраты, с помощью которых изменяется угол наклона. Эта операция осуществляется вручную (кроме печей СБЗ-10.50/9С исп. М02 и СБЗ-10.63/9С, в которых опоры имеют уклон в сторону разгрузки печи на один градус).

Нагреватели питаются через понижающие трансформаторы. Температура в зонах автоматически поддерживается посредством термопар и приборов теплового контроля, встроенных в щиты управления.

Технические данные электропечей приведены в табл. 33.

Печи с вращающимся барабаном (муфельные). Вторым типом печей с непрямым нагревом материала являются муфельные печи. Реторта в этих печах выполнена из специальных фасонных блоков из огнеупорного материала и образуют один центральный и ряд периферийных каналов, идущих вдоль всей печи. По центральному каналу перемещается обрабатываемый материал, по периферийным — дымовые газы, передающие тепло материалу через стенку фасонных камней.

Конструкции таких печей описаны на стр. 156 и 166.

Методика расчета печей с вращающимся барабаном. Исходными данными для расчета печи являются: производительность, состав и влажность материала, температурный режим и время обработки, характер и выделяющиеся при обработке паро- и газообразные продукты.

В материальном балансе определяют все приходные и расходные статьи, отнесенные к единице массы готовой продукции, включая унос и потери.

Таблица 33

Технические характеристики печей типа СБЗ/С

Параметры	Тип электропечи								
	СБЗ-1,4,25/6С исп. М02	СБЗ-1,4,25/9С исп. М02	СБЗ-2,2,25/6С исп. М02	СБЗ-2,2,25/9С исп. М02	СБЗ-4,40/9С исп. М02	СБЗ-4,32/9С исп. М03	СБЗ-6,63/3,5 исп. М02	СБЗ-10,50/9С исп. М02	СБЗ-10,63/9С
Установленная мощность, кВт	12	17	22,3	32,3	103	58	57	370	189
Напряжение питающей сети, В	380/220								
Частота, Гц	50								
Количество фаз	1				3		1	3	
Количество зон	3								
Мощность (в кВт):									
I зона					43	22	30	195	85
II зона	3,2	5	6,7	10	28,5	10	12	88	40
III зона					28,5	22	12	88	60
Напряжение на нагревателях (в В):									
I зона					60,8	66	91,2	71,2	152
II зона	25	60	60	84	53,2	45	50.7	41,3	120
III зона					53,2	66	50,7	41,3	104
Максимальная рабочая температура, °С	600	900	600		900		350	900	800
Производительность, кг/ч	5		16		40	16	73	416	83
Насыпная масса обрабатываемого продукта, кг/дм³	1,6		1,5		2		0,8	1,8	0,5
Продолжительность пребывания продукта в горячей зоне печи, мин	1,5		1,4		1,8	2,7	3	1,8	4
Расход воды для охлаждения, м³/ч	1	1,5	1	1,8	0,8	3	—	—	—
Угол наклона печи, градусы	0—5				1—5	0—7	2—5	—	—
Скорость вращения барабана, м/мин	0,3—10		0,5—5		0,4; 0,7; 1; 0,3—15		8,5; 10; 11,5	0,5; 0,64; 0,168	0,3; 0,4; 0,5
Размеры рабочего пространства (в мм):									
диаметр	124	126	195		376	370	580	960	968
длина	1920		2500		4000	3200	6300	5000	6300
Общая масса печи, кг	3540	3215	4900	4530	—	—	—	—	—

Тепловой расчет определяет удельные расходы тепла на обработку данного материала, определение возможности передачи материалу необходимого количества тепла при принятых размерах печи и ее производительности.

Определение основных размеров печи. Время пребывания материала в печи определяют по формуле:

$$\tau = \frac{0{,}308\,(\theta+24)\,L}{Dni}$$

$$\frac{\pi D^2}{4} L\varphi = \frac{G\tau}{60\gamma}$$

где τ — время пребывания материала в печи, мин; θ — угол естественного откоса материала, градусы; L — длина печи, м; D — диаметр печи, м; n — число оборотов печи, 1/мин; i — наклон печи, % к длине; φ — коэффициент или степень заполнения печи материалом; γ — насыпная масса материала, кг/м^3; G — производительность печи, кг/ч.

В этих уравнениях заданными или известными являются τ, θ, φ, G, γ. Произведение ni предварительно принимают равным 2—4.

Подставляя значения перечисленных выше величин и решая совместно уравнение, определяют диаметр и длину печи. Так, длину печи находят по формуле:

$$L = 3{,}25\,\frac{Dni\tau}{\theta+24}$$

Скорость дымовых газов и связанный с нею пылеунос необходимо учитывать, так как он может оказывать решающее влияние на подбор диаметра печи. Кроме того, необходимо принимать во внимание скорость отходящих из печи газов. Скорость принимают не более 2—3 м/с, учитывая при этом максимально допустимый пылеунос. Тогда уравнение для определения диаметра печи примет следующий вид:

$$D = 1{,}13\sqrt{\frac{V_{\text{о. г}}}{w_{\text{г}}}\cdot\frac{1}{1-\varphi}}$$

где $V_{\text{о. г}}$ — объемная скорость отходящих газов, м^3/ч; $w_{\text{г}}$ — линейная скорость отходящих газов, м/ч.

Объемную скорость отходящих газов определяют по уравнению:

$$V_{\text{о. г}} = [B_{\text{т}} V_{\text{д. г}} + V_{\text{р. г}}]\,G\,\frac{t+273}{273}$$

где $B_{\text{т}}$ — удельный расход топлива, кг/кг (м^3/кг) продукта; $V_{\text{д. г}}$ — количество дымовых газов, образующихся при сгорании 1 кг (1 м^3) топлива, м^3/кг (м^3/м^3); $V_{\text{р. г}}$ — объем реакционных газов, м^3/кг продукта; t — температура отходящих газов, °С; G — производительность печи, кг/ч.

Это уравнение является универсальным, так как может быть использовано для любой печи, независимо от ее назначения.

Для определения диаметра корпуса печи полученное значение внутреннего диаметра увеличивают на двойную толщину футеровки и окончательно уточняют с заводскими нормалями.

Для определения полной длины печи значения внутреннего диаметра подставляют в соответствующее уравнение.

В случае необходимости уменьшения длины печи без нарушения заданных условий режима ее работы и времени пребывания в ней материала, устанавливают порог на выходном торце печи, высоту которого h определяют методом подбора по формуле:

$$\tau = \frac{0{,}308\,(\theta+24)}{ni^2}\left[\frac{L_{2i}-100h}{D} + \frac{50h}{D-h-0{,}5H}\cdot\frac{\sqrt{Hh+h}}{H}\right]$$

В целях упрощения решения этой задачи можно пользоваться (рис. 81) уравнением:

$$\frac{L_1 - L_2}{k} \cdot \frac{i}{100} = k\left[\frac{\sqrt{k} + k}{2a - k - 0{,}5} - \frac{1}{a}\right]$$

где L_1 — длина печи; L_2 — уменьшенная длина печи, м; i — наклон печи, % к длине; k — отношение высоты кольца порога h к стрелке сегмента заполнения H печи без порога; $a = R/H$ — отношение внутреннего радиуса печи R к высоте стенки сегмента заполнения H печи без порога (значения a приведены на крайних рис. 81).

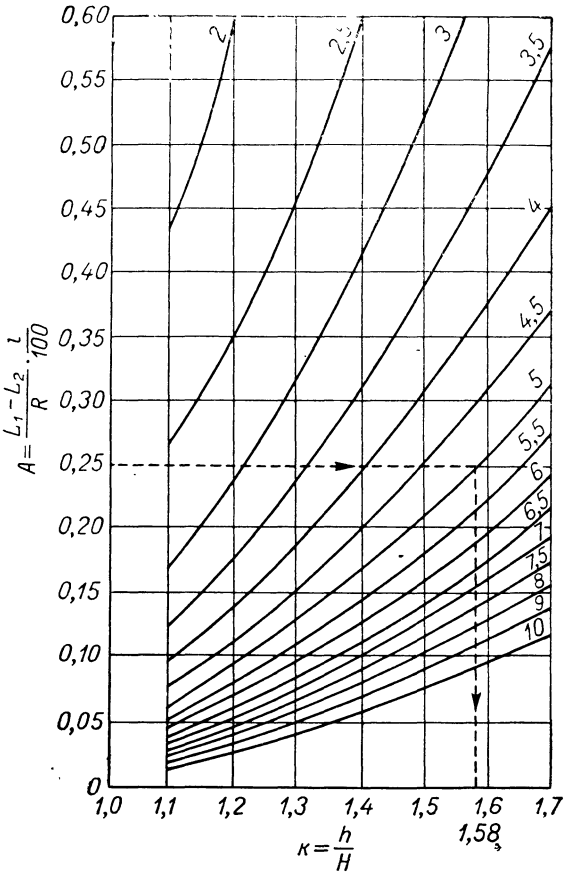


Рис. 81. График для определения высоты порога h при различных значениях $a = R : H$.

Определение высоты порога по рис. 81 производят в следующей последовательности: сначала определяют значение A, затем a. По A и a на графике находим k. Умножив k на H, получают высоту порога h, которая обеспечивает необходимое время пребывания материала в печи при уменьшенной ее длине. Эта высота одновременно является и высотой стрелки сегмента заполнения материалом печи с порогом.

Если степень заполнения печи окажется больше обычно принимаемой (10—15%), следует расчет повторить, приняв несколько большую длину печи, руко-

водствуясь нормалями завода-изготовителя. Длина и диаметр печи проверяются тепловыми расчетами, которые должны подтвердить их достаточность для передачи материалу необходимого количества тепла, определенного тепловым балансом. Для этого всегда задается температура потока газов на входе и принимается на выходе в зависимости от технологического процесса, проводимого в печи.

Уравнения баланса тепловых потоков имеют следующий вид:

$$Q_{\text{г}} = Q^{\text{л}}_{\text{г. ф}} + Q^{\text{к}}_{\text{г. ф}} + Q^{\text{л}}_{\text{г. м}} + Q^{\text{к}}_{\text{г. м}} + Q_{\text{у}} + Q^{\text{л}}_{\text{г. ф}} + Q^{\text{к}}_{\text{г. ф}} = Q^{\text{л}}_{\text{ф. м}} + \left(Q^{\text{г}}_{\text{ф. м}} + Q_{\text{п}}\right)$$

$$Q_{\text{м}} = Q^{\text{л}}_{\text{г. м}} + Q^{\text{к}}_{\text{г. м}} + Q^{\text{л}}_{\text{ф. м}} + Q^{\text{т}}_{\text{ф. м}}$$

где $Q_{\text{г}}$ — общее количество тепла, отдаваемое потоком газов, кВт; $Q_{\text{г. ф}}$ — количество тепла, отдаваемое потоком газов лучеиспусканием открытой поверхности футеровки, кВт; $Q^{\text{к}}_{\text{г. ф}}$ — то же конвекцией, кВт; $Q^{\text{л}}_{\text{г. м}}$ — количество тепла, отдаваемое потоком газов лучеиспусканием открытой поверхности материала, кВт; $Q^{\text{к}}_{\text{г. м}}$ — то же конвекцией, кВт; $Q_{\text{у}}$ — количество тепла, отдаваемое потоком газов и твердыми частицами, выделяющимися из материала, кВт; $Q^{\text{л}}_{\text{ф. м}}$ — количество тепла, отдаваемое лучеиспусканием открытой поверхностью футеровки открытой поверхности материала, кВт; $Q^{\text{г}}_{\text{ф. м}}$ — количество тепла, отдаваемое закрытой материалом поверхности футеровки закрытой поверхности материала, кВт; $Q_{\text{п}}$ — количество тепла, отдаваемое поверхностью печи окружающей среде, кВт; $Q_{\text{м}}$ — общее количество тепла, получаемое материалом, кВт.

Составляющие уравнений балансов определяют по следующим формулам:

$$Q^{\text{л}}_{\text{г. ф}} = 5{,}77 \cdot 10^{-3} \varepsilon'_{\text{ф}} \left[E'_{\text{г. ц}} \left(\frac{T_{\text{г}}}{100} \right)^4 - E''_{\text{г. ц}} \left(\frac{T_{\text{ф}}}{100} \right)^4 \right] L_{\text{д. ф}} L$$

$$Q^{\text{к}}_{\text{г. ф}} = 10^{-3} a_{\text{к}} \left(T_{\text{г}} - T_{\text{ф}} \right) L_{\text{д. м}} L_{\text{з}}$$

$$Q^{\text{л}}_{\text{ф. м}} = 5{,}77 \cdot 10^{-3} \varepsilon'_{\text{ф}} \varepsilon'_{\text{м}} \left[\left(1 - E''_{\text{г. ц}}\right) \left(\frac{T_{\text{ф}}}{100} \right)^4 - \left(1 - E'''_{\text{г. ц}}\right) \left(\frac{T_{\text{м}}}{100} \right)^4 \right] L_{\text{х. м}} L$$

$$Q^{\text{г}}_{\text{ф. м}} = \lambda_{\text{м}} \left[T_{\text{ф}} - T_{\text{м}} \right] L_{\text{д. м}} L$$

где $T_{\text{г}}$ — средняя по длине печи абсолютная температура газа, К; $T_{\text{ф}}$ — средняя по длине печи температура, К; $L_{\text{д. ф}}$ — длина дуги футеровки, м; $L_{\text{д. м}}$ — длина дуги материала, м; $L_{\text{з}}$ — длина зоны лучистого нагревания печи, м; $L_{\text{х. м}}$ — длина хорды материала, м; $T_{\text{м}}$ — средняя по длине печи температура материала, К.

Учитывая, что температура поверхности материала всегда будет выше его средней, фактическое количество тепла, передаваемого материалу, будет меньше рассчитанного по описанным выше формулам.

В этом случае необходимо вводить в правую часть уравнений поправочный коэффициент K (меньше единицы), характеризующий степень равномерности температуры материала.

Количество тепла, передаваемое потоком газов непосредственно открытой поверхности материала, определяется по формулам, аналогичным указанным выше, в которые вместо температуры и коэффициента излучения поверхности футеровки представляются аналогичные их значения для материала. Суммируя количество тепла, передаваемое материалу потоком газов непосредственно и через футеровку по всей длине печи, получим общее количество, которое должно соответствовать заданному тепловым балансом.

Приведенная методика теплового расчета печи содержит ряд условностей и упрощений. Например, температуры материала, потока газов и футеровки принимаются постоянными на всем протяжении печи и равными полусумме начальных и конечных температур; потери тепла в окружающую среду определяются на основании средних опытных данных в процентном отношении к общему его расходу, при определении количества тепла, передаваемого материалу футеровкой, не учитывается влияние на интенсивность теплопередачи вращения печи и периодичность изменения температуры футеровки. Однако, как показали

сравнительные подсчеты и сопоставления их с фактическими данными, полученные результаты не дают резких отклонений, выходящих за пределы обычно допускаемых при практическом их применении.

Диаметр муфеля рассчитывают по производительности печи и коэффициенту его заполнения материалом, пользуясь следующей формулой:

$$G = \frac{153}{(v+24)}\,\gamma n i \varphi D^3$$

где G — производительность муфеля, кг/ч; γ — насыпная масса материала, кг/м³; v — угол естественного откоса материала, градусы; i — наклон печи, % к длине; n — число оборотов печи, об/мин; φ — коэффициент заполнения муфеля:

$$D \sqrt{\frac{G\,(v+24)}{153\gamma n i \varphi}}$$

Задаваясь произведением числа оборотов печи на ее наклон, при известной производительности и принятом коэффициенте заполнения, по указанной выше формуле определяют диаметр муфеля.

Для определения суммарной площади поперечного сечения каналов, по которым движется поток газов, необходимо задаться скоростью движения в них газов (обычно она равна 6—8 м/с). Зная общее сечение этих каналов, толщину их стенок и стенок муфеля, легко найти наружный диаметр печи.

Остальные размеры определяются методом, аналогичным для пламенных печей.

Тепловой расчет. В муфельных печах обрабатываемый материал получает тепло через стенки муфеля, которые обогреваются потоком газов, движущихся по периферийным каналам печи. Методика теплового расчета этой печи остается аналогичной изложенной выше, но несколько изменяются общие уравнения тепловых потоков.

1. Так как тепло передается материалу только от внутренней поверхности футеровки, следовательно уравнения, определяющие количество тепла, имеют следующий вид:

$$Q = Q^{\text{л}}_{\text{ф.м}} + Q^{\text{т}}_{\text{ф.м}}; \quad Q = Q^{\text{к}}_{\text{г.ф}} + Q^{\text{л}}_{\text{г.ф}}$$

2. Количество тепла, получаемое стенкой муфеля (являющейся рабочей камерой печи) от греющего газа:

$$Q^{\text{к}}_{\text{г.ф}} + Q^{\text{л}}_{\text{г.ф}} - Q_{\text{г}} = Q$$

3. Количество тепла, передаваемое материалу через стенку:

$$Q^{\text{л}}_{\text{ф.м}} + Q^{\text{т}}_{\text{ф.м}} = k\left(T^{\text{н}}_{\text{ф}} - T^{\text{в}}_{\text{ф}}\right)$$

Раскрывая эти четыре уравнения балансов тепловых потоков, получим дополнительно еще четыре уравнения:

$$Q^{\text{л}}_{\text{ф.м}} = 5{,}77 \cdot 10^{-3}\varepsilon'_{\text{ф}}\varepsilon'_{\text{м}}\left[(1-E''_{\text{г.п}})\left(\frac{T^{\text{в}}_{\text{ф}}}{100}\right)^4 - (1-E'''_{\text{г.п}})\left(\frac{T_{\text{м}}}{100}\right)^4\right] L_{\text{х.м}} L_{\text{з}}$$

$$Q^{\text{т}}_{\text{ф.м}} = 5{,}77 \cdot 10^{-3}\varepsilon'_{\text{ф}}\varepsilon'_{\text{м}}\left[\left(\frac{T^{\text{в}}_{\text{ф}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{м}}}{100}\right)^4\right] L_{\text{д.ф}} L_{\text{з}}$$

$$Q^{\text{л}}_{\text{г.ф}} = 5{,}77 \cdot 10^{-3}\varepsilon'_{\text{г.п}}\left[\varepsilon'_{\text{г.п}}\left(\frac{T_{\text{г}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T^{\text{н}}_{\text{ф}}}{100}\right)^4 \varepsilon''_{\text{г.п}}\right] L_{\text{д.ф}} L_{\text{з}}$$

$$Q^{\text{к}}_{\text{г.ф}} = 10^{-3}\alpha\left(T_{\text{г}} - T^{\text{в}}_{\text{ф}}\right) L_{\text{д.ф}} L_{\text{з}}$$

В этих уравнениях «в» обозначает внутреннюю поверхность муфеля, а «п» — наружную.

В результате можно составить восемь уравнений с восемью неизвестными: $Q^{д}_{ф.м}$, $Q^{т}_{ф.м}$, $Q^{к}_{г.ф}$, $Q^{д}_{г.ф}$, $T^{н}_{ф}$, $E''_{в.п}$, $E'''_{г.п}$ и эти уравнения решаются обычными методами.

Вследствие разницы температур наружной поверхности материала и его внутреннего слоя в уравнения должен вводиться поправочный коэффициент k (меньший единицы): обычно $k = 0{,}85—0{,}95$ (в зависимости от размеров слоя и крупности частиц материала).

Определение мощности привода. Мощность, потребляемая вращающимися печами, расходуется на подъем материала, поступающего в печь до угла естественного откоса, на перемещение материала, на преодоление трения в цапфах и на преодоление трения качения бандажей по роликам. Для определения мощности привода необходимо:

1. Определить площадь поперечного сечения печи, занятого материалом:

$$F = \frac{\pi D^2_{ф.в}}{4}\varphi$$

где $D_{ф.в}$ — внутренний диаметр футеровки, м; φ — коэффициент заполнения барабана.

2. Масса материала, находящегося внутри печи:

$$G_0 = FL\gamma$$

где L — длина печи, м; γ — объемная масса материала, кг/м³.

3. Момент от трения качения бандажей по роликам и от трения в подшипниках качения:

$$M' = g\frac{G+G_0}{\cos a D_1}\times$$

$$\times\left[(D+D_1)k+\mu D\frac{d}{2}\right]$$

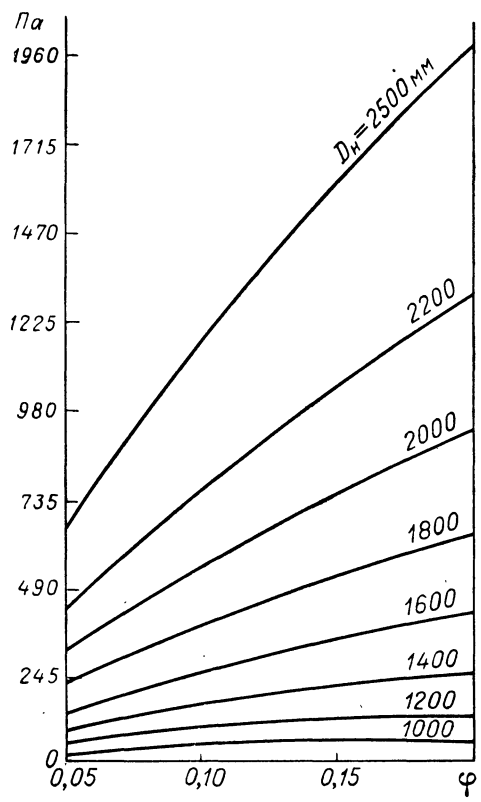


Рис. 82. График для определения момента от действия тяжести материалов.

где G — масса корпуса печи с футеровкой и с закрепленными на нем деталями, кг; g — свободное падение (9,81 м/с²); D — наружный диаметр бандажа, м; D_1 — диаметр опорного ролика, м; k — коэффициент трения качения бандажа по роликам, равный 0,0005 м; μ — коэффициент трения в подшипниках качения, равный 0,015, d — диаметр цапфы оси опорного ролика, м; $a = 30°$ — угол между вертикальной осью сечения печи и осью опорного ролика.

4. Момент от действия силы тяжести материала, находящегося в печи:

$$M'' = mMc$$

где m — отношение заданной объемной массы материала к плоскости (1000 кг/м³); M — момент от действия силы тяжести материала, приходящийся на 1 м длины печи при объемной массе материала и плотности 1000 кг/м³ (рис. 82); c — отношение заданной длины печи (в м) к 1 м.

5. Суммарный момент $M_c = M' + M''$.

6. Расчетная мощность привода:

$$N_{\text{р}} = \frac{M_{\text{с}} n A}{974\eta}$$

где n — максимальная частота вращения печи, об/мин; A — коэффициент, учитывающий перекосы при монтаже, неточность сборки и другие неисправности и равный 1,15; η — к. п. д. привода (при открытом приводе $\eta = 0{,}85$, при смешанном $\eta = 0{,}9$, при закрытом $\eta = 0{,}95$).

7. Установочная мощность привода:

$$N_{\text{уст}} = N_{\text{р}} B$$

где B — коэффициент снижения мощности электродвигателя; его рассчитывают по уравнению $B = b_1 b_2$, в котором b_1 — коэффициент, учитывающий конструктивное использование электродвигателя; он выбирается в зависимости от частоты вращения двигателя:

	Для защищенного электродвигателя	Для закрытого электродвигателя
1500 об/мин	1,0	1,1
1000 »	1,0	1,15
750 »	1,05	1,2

b_2 — коэффициент, учитывающий температуру окружающей среды:

35 °С	1,0	45 °С	1,12
40 °С	1,05	50 °С	1,25

Головной организацией, занимающейся проектированием печей с вращающимся барабаном, является ЛенНИИхиммаш.

Печи производства сероуглерода

Общие сведения. В промышленности наибольшее распространение получил синтез сероуглерода, проводимый в ретортах или электропечах, с применением в качестве сырья твердого углеродистого материала и серы. Обычно используют природную или газовую серу, соответствующую первому сорту ГОСТа 127—64 и древесный уголь из твердолиственных пород марки ТЛ по ГОСТу 7657—55.

Существует три типа печей, применяемых для получения сероуглерода:

1) пламенные для получения сероуглерода в ретортах;
2) электрические для электротермического метода;
3) окислительная Клауса для регенерации серы.

Печи ретортные для получения сероуглерода. Для получения сероуглерода применяют реторты с подачей жидкой серы в зольник и реторты с предварительной газификацией серы. Для обогревания реторт обеих конструкций используют одно- и многогорелочные пламенные печи. Их монтируют из двух или трех реторт, разделенных проходами. Эти блоки располагают в один ряд фронтом в противоположную от конденсаторов сторону. Для смены реторт передние стенки печей и металлические площадки делают разборными. Двухрядное размещение блоков нерационально, так как трудно сменять реторты.

Реторты внутри печи помещаются в специальном гнезде-камере обогревания. Внутренняя кладка гнезд, соприкасающихся с пламе-

нем и топочными газами, а также рекуператоры, выполняются из огнеупорного шамотного кирпича, а внешние — из красного. Внутри гнезда реторту устанавливают свободно на расстоянии 200—300 мм от стенок кладки.

Печи одногорелочные. На рис. 83 схематически представлена одногорелочная печь для газификационной реторты. Реторту устанавливают на специальный постамент, разделяющий камеру горения на две равные части. Для равномерного распределения топочных газов на два потока постамент со стороны горелки

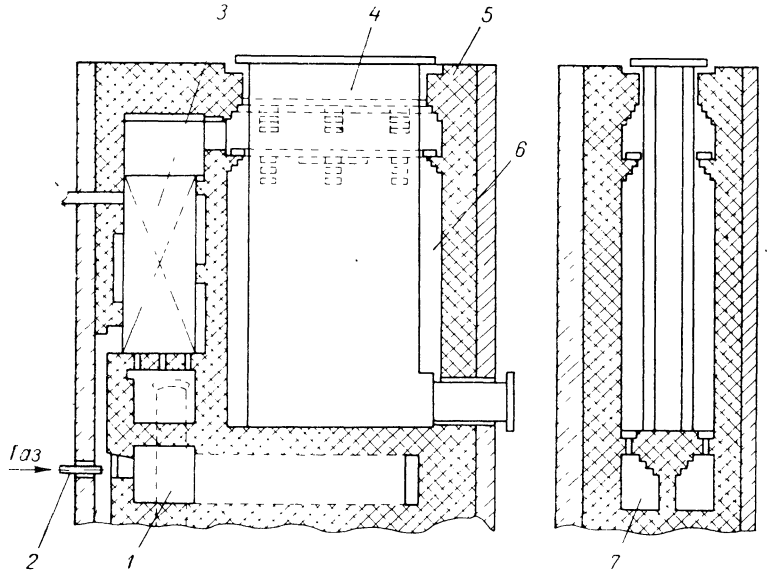


Рис. 83. Печь ретортная одногорелочная для получения сероуглерода:
1 — камера для горения; *2* — горелка; *3* — рекуператор; *4* — реторта; *5* — футеровка; *6* — камера для нагревания реторт; *7* — дымоход.

имеет форму конуса-рассекателя; горелка расположена строго симметрично по отношению к обеим частям камеры. Днище реторты огнеупорным сводом предохраняется от непосредственного воздействия пламени. Горелка расположена по центру камеры горения, образованной двумя рядами столбиков. Продукты горения проходят через 2—3 промежутка между столбиками и через 2—3 вертикальных канала, называемых «прогарами», а затем поступают в камеру *6*.

Дымовые газы в рекуператор поступают через канал в верхней части с тыльной стороны реторты. Ниже выхода топочных газов в дымоход по боковым и задней стенкам выпускаются карнизы из кирпича, сужающие сечение верхней части камеры *6* и способствующие созданию в ней подпора топочных газов. Рекуператор выполнен из шамотных труб, через которые движутся дымовые газы, а в междутрубное пространство подается воздух.

Расход генераторного газа на печь составляет 150—180 м³/г.

Многогорелочные печи (рис. 84) не имеют специальной камеры горения. Обычно монтируют шесть горелок в небольших углублениях — нишах *1* таким образом, чтобы факел горелки был направлен горизонтально вдоль боковой стенки реторты. Горелки расположены по высоте в шахматном порядке на тыльной стороне передней стены, по три горелки на сторону. Расход генераторного газа на печь составляет 150—180 м³/ч, равномерно распределенный на шесть малых горелок. Металлический рекуператор расположен в борове. Дымовые газы отводятся в борова *4*. Многогорелочные печи особых преимуществ по сравнению с одногорелочными не имеют. Для них характерна жесткость горелочных факелов вблизи корпуса реторты и появления окислительного пламени из-за трудности регулировки подачи воздуха.

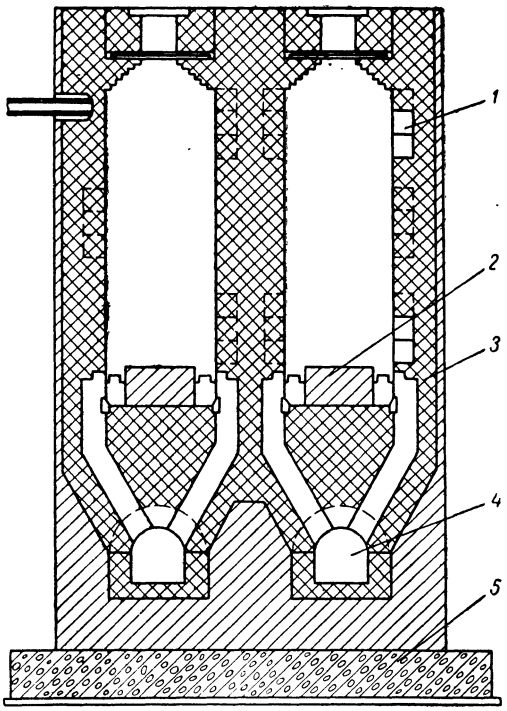


Рис. 84. Печь ретортная, многогорелочная для получения сероуглерода:
1 — ниша для горелок; *2* — подставка; *3* — футеровка; *4* — боров; *5* — фундамент.

Коэффициент полезного использования тепла в пламенных печах составляет 0,20—0,25 из-за большого уноса тепла с дымовыми газами, так как последние по условиям ведения процесса выходят из печи с температурой 700 °С и выше.

Печи электрические для получения сероуглерода. Электротермический метод получения сероуглерода отличается от ретортного тем, что необходимое для нагревания реагирующих компонентов тепло подводится не за счет наружного обогревания, а выделяется внутри самого реактора при преобразовании электрической энергии в тепловую. Основные преимущества таких электропечей:

1) объем и производительность больше, чем у реторт;
2) коэффициент полезного использования тепла достигает 70%;
3) возможность автоматизации и механизации процесса;
4) лучшие санитарно-гигиенические условия труда.

Обычно работают на двух видах электропечей: сопротивления и дуговые. Печи сопротивления — на неподвижном слое угля, а дуговые — с углем, находящимся во взвешенном состоянии.

Электрические печи сопротивления. В настоящее время наибольшее распространение получили однофазные электропечи с графитированными или металлическими электродами. На рис. 85 показана однофазная электропечь с графитированными электродами. Ее показатели следующие:

Рабочий объем . . .	7 м³
Мощность	240 кВт
Рабочее напряжение	80—120 В
Сила тока	1000—2000 А
Расход электроэнергии	1250—1350 кВт·ч/т сероуглерода
Производительность	3,14—3,40 т/сутки

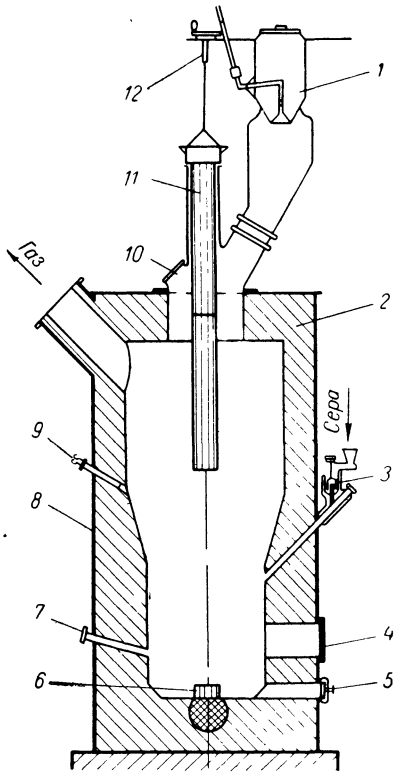


Рис. 85. Печь электрическая, однофазная с графитированным электродом для получения сероуглерода:

1 — бункер для загрузки угля; *2* — футеровка; *3* — дозатор серы; *4* — газ; *5* — люк для чистки; *6* — нижний электрод; *7* — отверстие для перемешивания; *8* — кожух; *9* — термопара; *10* — люк для штанговки; *11* — верхний электрод; *12* — механизм подъема электрода.

В реакционную шахту печи помещены два графитированных электрода: нижний *6* и верхний *11*. Верхний электрод может перемещаться по вертикали при помощи троса и устройства *12*, укрепленного на верхней рабочей площадке.

Древесный уголь загружают в электропечь через бункер *1* с колокольным затвором, соединяющимся со шлемом печи. Шлем, кроме патрубков для электрода и загрузки угля, имеет еще один патрубок, предназначенный для перемешивания шихты сверху, в случае зависания угля. Сера поступает в жидком виде через три дозирующих устройства *3*. Продукты реакции выходят через люк *10*. За температурой процесса наблюдают по трем термопарам, расположенным в нижней, средней и верхней зонах электропечи. При нормальном режиме она должна быть 400—450 °С и не более 600 °С.

Более совершенной и принципиально новой является трехфазная электропечь (рис. 86). Ее показатели следующие:

Рабочий объем	15 м³
Мощность	480 кВт
Рабочее напряжение	30—74 В
Сила тока	3800 А
Расход электроэнергии	До 1000 кВт·ч/т сероуглерода
Производительность	6—8 т/сутки

К днищу корпуса приварены четыре лапы, из которых одна устанавливается на фундаменте. В огнеупорной футеровке из высокоглиноземистого шамота заподлицо с внутренней поверхностью шахты выложены вертикальные каналы, которые служат для испарения

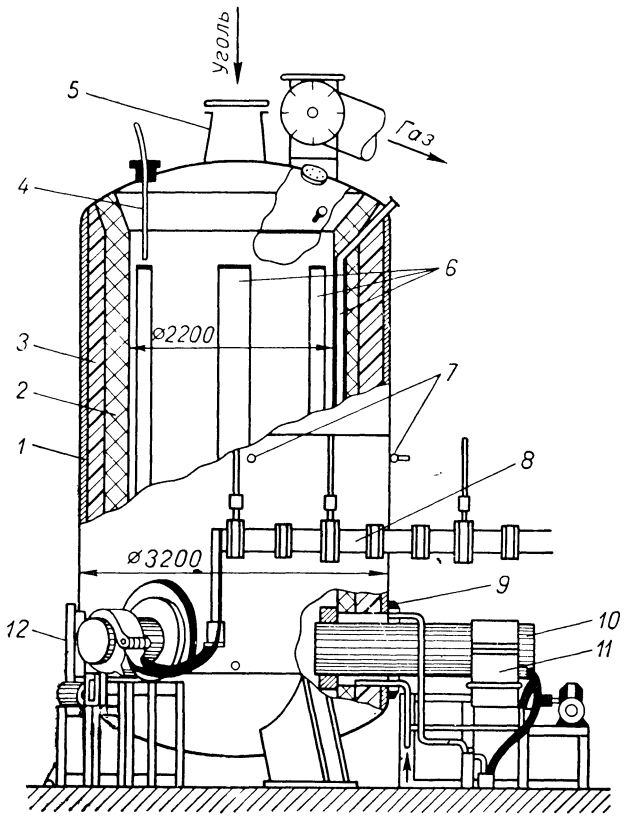


Рис. 86. Печь электрическая трехфазная для получения сероуглерода:

1 — кожух; *2* — огнеупорная футеровка; *3* — теплоизоляционная футеровка; *4* — электронный уровнемер; *5* — люк для загрузки угля; *6* — горизонтальные каналы; *7* — термопара; *8* — токоподводящая шина; *9* — сальник; *10* — электрод; *11* — электрододержатель; *12* — люк.

жидкой серы и перегревания ее паров. Сера в каналы подается сверху, стекает по карборундовым каскадным камням, испаряется и перегретые пары ее вводятся в нижнюю часть реакционной шахты.

В нижнюю часть печи введены три графитированных электрода диаметром 500 мм, установленных под углом 120° друг к другу. Герметичность реакционного пространства в местах ввода электродов достигается применением охлаждаемых водой сальников с уплотнением из асбестографита.

Методика расчета сероуглеродных электрических печей. Затраты тепла на 1 т сероуглерода составляют:

$$Q=(Q_1+Q_2+Q_3+Q_4+Q_5)\,\eta$$

где Q_1 — расход тепла на нагревание жидкой серы, испарение, диссоциацию и перегревание ее паров до температуры реакции, кВт; Q_2 — расход тепла на нагревание угля, кВт; Q_3 — теплота реакции, кВт; Q_4 — расход тепла сероуглеродом, кВт; Q_5 — расход тепла в окружающую среду, кВт; η — тепловой к. п. д. печи (70—75%).

Подсчитанное таким образом удельное количество необходимой энергии составляет:

$$Q \approx 1000 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т сероуглерода}$$

Зная удельный расход электроэнергии и задаваясь производительностью электропечи, подсчитывают мощность печного трансформатора по эмпирической формуле:

$$N=\frac{GA}{24\cos\varphi k_1 k_2}$$

где G — производительность электропечи, т/сутки; A — расход электроэнергии, кВт·ч/т; φ — коэффициент мощности; k_1 — коэффициент использования мощности; k_2 — коэффициент использования времени.

В соответствии с полученным результатом подбирают трансформатор по каталогу. Опыт показывает, что при производительности 5—7 т рабочее напряжение для однофазовых печей должно быть 60—100 В, а для трехфазовых 35—75 В.

При выборе типа электродов преимущество следует отдавать графитированным, стойким к парам серы.

При определении диаметра электрода имеют в виду, что плотность тока должна составлять 3—4 А/см^2. При такой плотности тока исключается возможность образования вольтовой дуги между угольной шахтой и электродами.

При выборе геометрических размеров печи учитывают, что диаметр шахты должен быть не менее 2 м, во избежание возникновения зависаний шихты. Высота слоя угля должна быть 5—6 м для создания определенного давления на нижние слои угля и надежного контакта между шихтой и электродами.

Печь окислительная Клауса для регенерации серы. Отходящий газ после сорбции содержит довольно много сульфидов. Это дает возможность использовать его для получения серы или сернистого газа. Состав отходящих газов следующий (в объемн.%):

H_2	55—60	CO	6—8
CS_2	1	COS	14—18
CO_2	8—12	N_2	8—12

Для регенерации серы в чистом виде из отходящих газов заводы оборудуются установками для окисления отходящих газов. В этих установках образуются сульфиды и сернистый газ. Окисление сульфидов проводится в печах окислительных Клауса в присутствии катализатора боксита.

Реакционная печь Клауса (рис. 87) представляет собой железный кожух со сферической или плоской крышкой *4*. Изнутри печь футеруется огнеупорным кирпичом с небольшой теплоизоляционной прослойкой *5*. Полезный объем ее от 3 до 50 м^3. В верхнюю крышку или в верхнюю часть кожуха вмонтированы одна или несколько газовых горелок типа «труба в трубе». На крышке печи имеется один или несколько предохранительных люков *3*, закрытых

тяжелыми крышками, уплотненными песком. Специальная скоба *2* не позволяет смещаться крышкам в сторону. В случае вспышки крышки подскакивают вверх по направляющим, ударяются о скобы и вновь опускаются на песочный затвор.

Верхняя крышка кожуха печи защищена от действия высоких температур огнеупорным кирпичом или огнеупорной обмазкой. Печи большого диаметра имеют плоскую водоохлаждаемую крышку.

Дно печи имеет наклон для стока жидкой серы, над которым расположена кирпичная колосниковая решетка *9*.

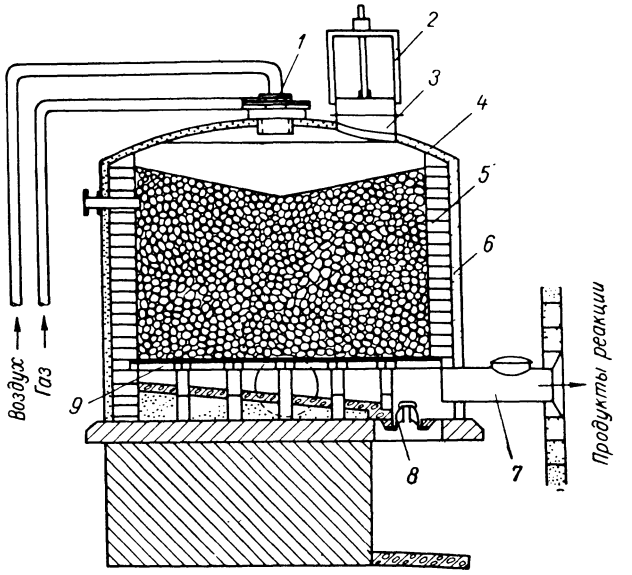


Рис. 87. Печь окислительная Клауса для регенерации серы:

1 — горелка; *2* — скоба; *3* — люк; *4* — крышка; *5* — футеровка; *6* — кожух; *7* — газоход; *8* — сифон; *9* — колосниковая решетка.

Основная часть серы в жидком виде выводится через сифон *8*. Для предотвращения затвердевания серы в сифоне к нему подводится пар. В больших печах жидкая сера отводится через коллектор, обогреваемый паром. Рядом с газоотходом имеется широкий лаз для очистки подколосникового пространства и для первоначального розжига печи дровами или углем.

Печь производства и регенерации активированного антрацита в кипящем слое

Общие сведения. Активированный антрацит является хорошим адсорбентом для очистки промышленных сточных вод, так как обладает высокой механической прочностью, благодаря чему его можно подвергать многократной термической регенерации.

Для увеличения активности антрацита его подвергают нагреву для удаления летучих веществ, в результате чего получаются микропоры. Установлено, что при активировании антрацита в кипящем слое наилучшая пористость получается при невысокой скорости выгорания углерода в среде водяного пара; наиболее эффективным методом снижения скорости выгорания углерода является уменьшение размера частиц перерабатываемого антрацита до 0,3—0,6 мм при соответствующем сокращении расхода реакционного газа и удлинении процесса активации до 5 ч. Структура активированного антрацита, полученного в кипящем слое, довольно однородна с преобладающим количеством микропор.

Пористость полученного активированного антрацита следующая (в $см^3/г$):

Микропоры	0,29
Переходные поры	0,09
Макропоры	0,09
Суммарный объем пор	0,47

В активированном антраците поры располагаются в верхних слоях частиц, что указывает на высокую механическую прочность этого угля и большую его активность при адсорбции, так как в этом случае доступ к активной поверхности органических веществ, растворенных в воде, облегчается.

В процессе очистки промышленных сточных вод активированным антрацитом ароматические вещества, содержащиеся в стоках, оседают в порах антрацита, что ухудшает его адсорбционные свойства. Для восстановления активности антрацита его регенерируют нагреванием при 700—750 °С в среде водяного пара или парогазовой смеси. Перегретый пар способствует десорбции органических соединений и, действуя как окислитель, препятствует образованию в парах антрацита смолистых и высокомолекулярных веществ. Длительность процесса регенерации в печи КС составляет 40—60 мин. Потери антрацита при регенерации равны 10%.

Конструкция печи КС. Активацию и регенерацию антрацита проводят в печи КС, конструкция которой приведена на рис. 88.

Процессы регенерации и активации антрацита проводятся в кипящем слое в раздельных, последовательно расположенных камерах, что позволяет повысить теплотехнический к. п. д. печи. Печь представляет собой вертикальную цилиндрическую шахту, двумя газораспределительными шахтами разделенную на три камеры:

а) камера топочная с внутренним диаметром 2200 мм;

б) камера активации антрацита с внутренним диаметром 2440 мм;

в) камера регенерации с внутренним диаметром 2650 мм.

Огнеупорная футеровка печи выполнена из шамотного кирпича класса А, теплоизолирована диатомовым кирпичом и асбестовым листом. Для придания прочности и газоплотности футеровка печи заключена в сварной металлический кожух из листовой стали.

Газораспределительные решетки изготовлены из жаропрочного бетона. Решетка камеры активации беспровальная с керамическими

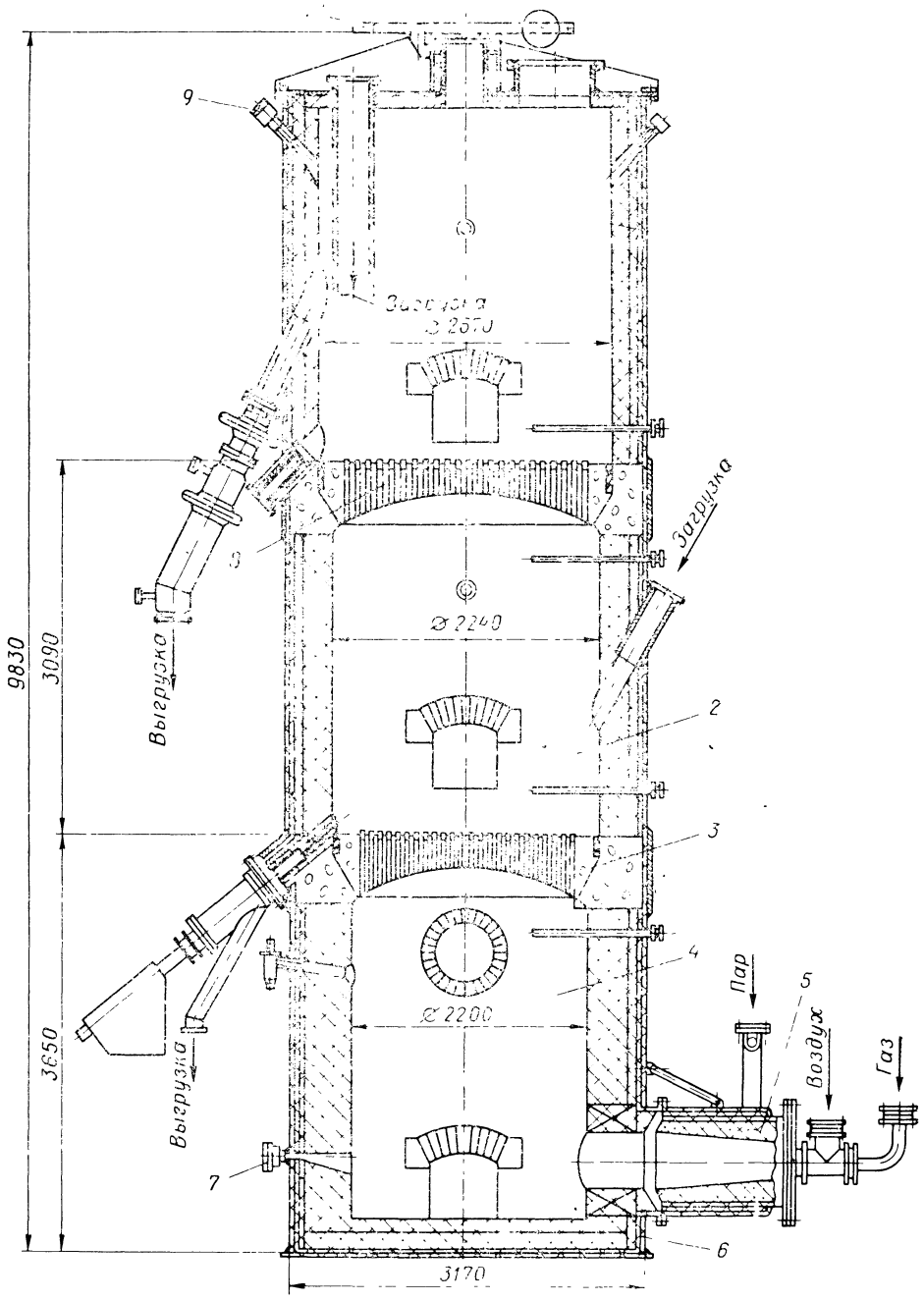


Рис. 88. Печь КС для регенерации и активации антрацита:

1 — зона регенерации; *2* — зона активации; *3* — газораспределительная решетка зоны активации; *4* — зона смешения; *5* — горелка ИГ; *6* — кожух; *7* и *9* — гляделки; *8* — газораспределительная решетка зоны регенерации; *10* — взрывной клапан.

колпачками, а решетка камеры регенерации провальная и состоит из керамических фурм. Живое сечение обеих решеток принято равным 4% от ее площади. Конструкция газораспределительных решеток приведена на рис. 89.

Теплоноситель для создания ожижающего слоя и осуществления термотехнологических процессов подготавливается в топочной камере, где проводится сжигание смеси природного газа и воздуха,

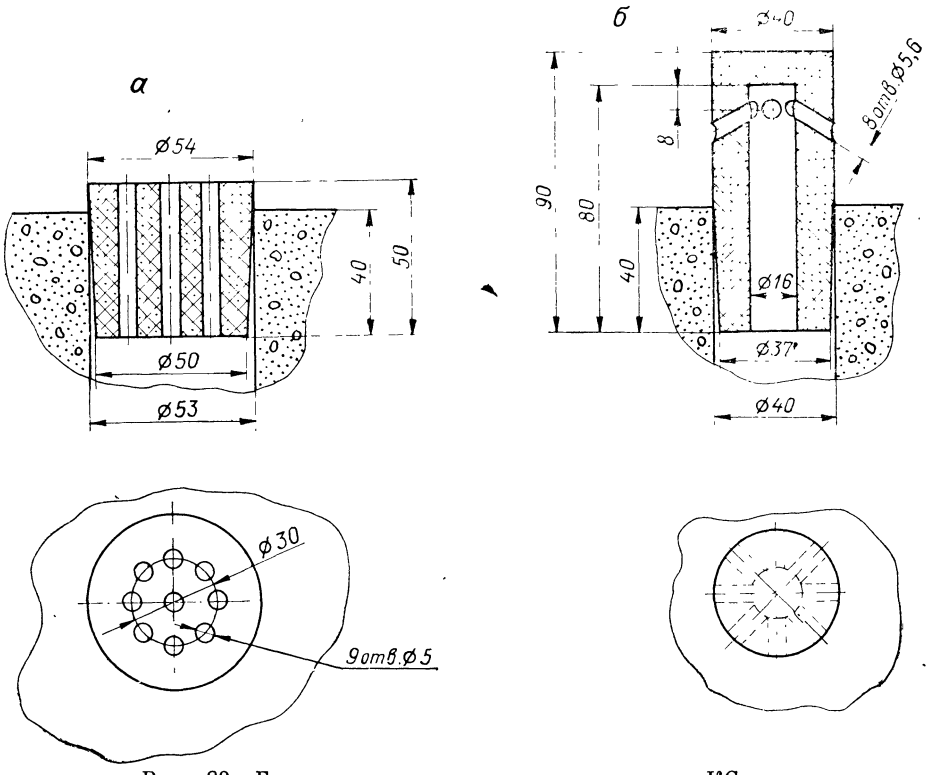


Рис. 89. Газораспределительные решетки печи КС:
а — зоны активации; *б* — зоны регенерации.

приготовленного в специальной горелке конструкции ИГ. Конструкция горелки показана на рис. 88.

Сжигание производится с коэффициентом использования воздуха $\alpha \approx 0{,}95$ для предотвращения появления кислорода в теплоносителе. Дымовые газы до требуемой температуры 1200 °С обогреваются паром (0,3 МПа) и его расход составляет 1800 кг/ч. Расход природного газа — 110 м³/ч, а расход воздуха — 100 м³/ч. Теплоноситель состоит из CO_2, H_2O, N_2 и некоторого количества CO, H_2 и CH_4. Температура теплоносителя регулируется изменением в нем количества пара.

В топочную камеру предусмотрен лаз (насухо заложенный огнеупорным кирпичом) для ремонта топочной камеры. На боковой

стенке против горелки установлена гляделка для наблюдения за процессом горения, имеются также отверстия для установки приборов КИП, измеряющих давление в камере и температуру теплоносителя.

Загрузка камер активации и регенерации производится в кипящий слой из специальных бункеров по течкам через шлюзовый затвор.

Разгрузка из камеры активации осуществляется периодически с уровня газораспределительной решетки, а разгрузка из камеры регенерации с кипящего слоя — непрерывно через течку с шлюзовым затвором. Обе камеры имеют лазы для очистки газораспределительной камеры от оставшихся крупных частиц и других включений.

В обеих камерах также имеются отверстия для установки приборов КИП. Над решеткой регенерации на своде установлен взрывной клапан для предохранения конструкции и обслуживающего персонала от несчастных случаев. Через этот клапан и отводятся дымовые газы.

Производительность рассматриваемой печи при периодическом режиме активации антрацита составляет 1500 кг/сутки, а при непрерывном режиме регенерации антрацита 1100 кг/сутки. Высота слоя антрацита на решетке обеих камер равна 1000 мм.

Гидравлический режим в печи следующий: в топочной камере давление 13 кПа, в камере активации 7 кПа, в камере регенерации разрежение 0,5 кПа.

Температурный режим в печи следующий: в топочной камере — 1200 °С, в камере активации 900 °С, в камере регенерации 650 °С.

Размер частиц антрацита, подлежащий термообработке в печи КС, 2 мм.

Эксплуатация печи показала, что сочетание самостоятельного периодического и непрерывных процессов в одном агрегате не приводит к нарушениям технологических режимов и не затрудняет эксплуатацию печи.

Печи для сжигания отходов химических производств

Классификация печей. Большинство технологических процессов химических производств проводятся таким образом, чтобы не было отходов производства. Однако в некоторых производствах такие отходы неизбежны. К ним, в первую очередь, следует отнести сточные воды, содержащие токсичные органические и неорганические вещества, которые не удается обезвредить химическими, биологическими и другими способами. В этом случае применяют термический метод. Печи для сжигания отходов можно разделить на следующие типы:

1) печи для сжигания твердых отходов;
2) печи для сжигания шламов;
3) печи для сжигания сточных вод;
4) печи для сжигания отходящих токсичных газов.

Печь для сжигания твердых отходов. Твердыми отходами химических производств являются бумажные мешки,

ветошь, деревянная тара и другие отходы, которые пропитаны химическими веществами. Сжигание твердых отходов производится в печи, изображенной на рис. 90.

Печь двухкамерная с перевальной стенкой. В первой камере происходит сгорание твердых отходов, во второй догорание. Печь футерована шамотным кирпичом класса Б и заключена в металлический каркас. Сжигание отходов производится в слое на неподвижной колосниковой решетке. Загрузку отходов в печь производят через бункер, расположенный над печью. Бункер имеет заслонку типа мигалки, которая автоматически закрывает его после загрузки. Для сжигания влажных материалов в печи установлена инжекционная горелка. Агрегатная нагрузка печи до 100 кг/ч.

Печи для сжигания шламов. *Печи многополочные.* Сточные воды и шламы, содержащие наряду с разнообразными органическими составными частями много минеральных веществ, а потому плохо поддающиеся распылению с помощью форсунок. Одна из конструкций многополочных приведена на рис. 91. Отходы в такие печи подаются насосами или вводятся туда с помощью шнека.

Многополочные механизированные печи имеют от 5 до 12 полок (подов).

При необходимости в качестве топлива применяется мазут или природный газ. При использовании мазута к печи дополнительно устанавливается отдельно стоящая топка (левая сторона рисунка). Сжигание природного газа производится в горелках, непосредственно вмонтированных в кожух печи (правая сторона рисунка). Печь имеет три зоны: сушки (*а*), сжигания (*б*) и охлаждения (*в*).

Печь представляет собой стальной кожух, футерованный изнутри огнеупорным фасонным кирпичом и теплоизолированный диатомовым кирпичом. Нижняя часть печи заканчивается каркасом, который установлен на бетонный фундамент.

Через центр печи проходит вал, на котором над каждым подом укреплено два гребка с зубьями. Вал печи полый, выполнен в виде цилиндров (наружного и внутреннего) и состоит из отдельных частей, скрепленных по высоте между собой болтами. Внизу вал печи соединен с шестерней, опирающейся на стальную буксу. Вал приводится во вращение от редуктора, который соединен с валом привода. На этом валу насажена малая шестерня, вращающая большую шестерню.

Вал печи и гребки охлаждаются воздухом, который поступает снизу по внутреннему каналу вала. Воздух входит в каждый гребок через отверстия в торце цилиндрической его части, проходит внутри гребка, огибает перегородку и выходит в другой канал центрального вала печи (между его наружным и внутренним цилиндрами), откуда по трубе выходит из печи и подается как подогретый первичный воздух для сжигания топлива к форсунке топки или горелкам печи.

Шлам шнеком подается на периферию первой полки сушильной зоны печи и вращающимися зубьями гребков передвигается от периферии к центру. Затем ссыпается на второй под через кольцевое отверстие вокруг вала печи. Далее гребками передвигается от центра

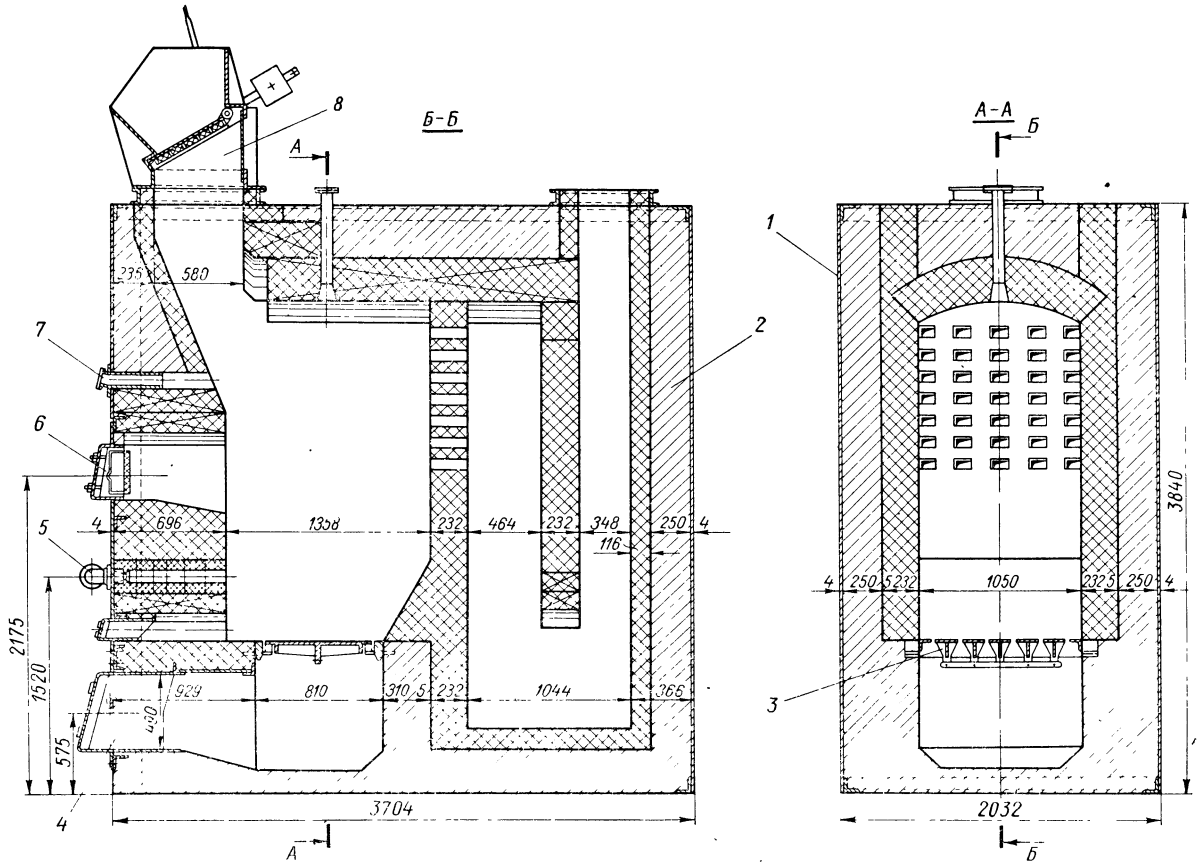


Рис. 90. Печь для сжигания твердых отходов:
1 — каркас; *2* — футеровка; *3* — колосниковая решетка; *4* — окно для выгрузки золы; *5* — горелка; *6* — окно для загрузки сырья; *7* — гляделка; *8* — бункер.

к периферии, и по специальным отверстиям поступает на третью полку и т. д.

Сушка производится за счет использования тепла газов, которые поднимаются из зоны сжигания навстречу шламу, перемещающемуся

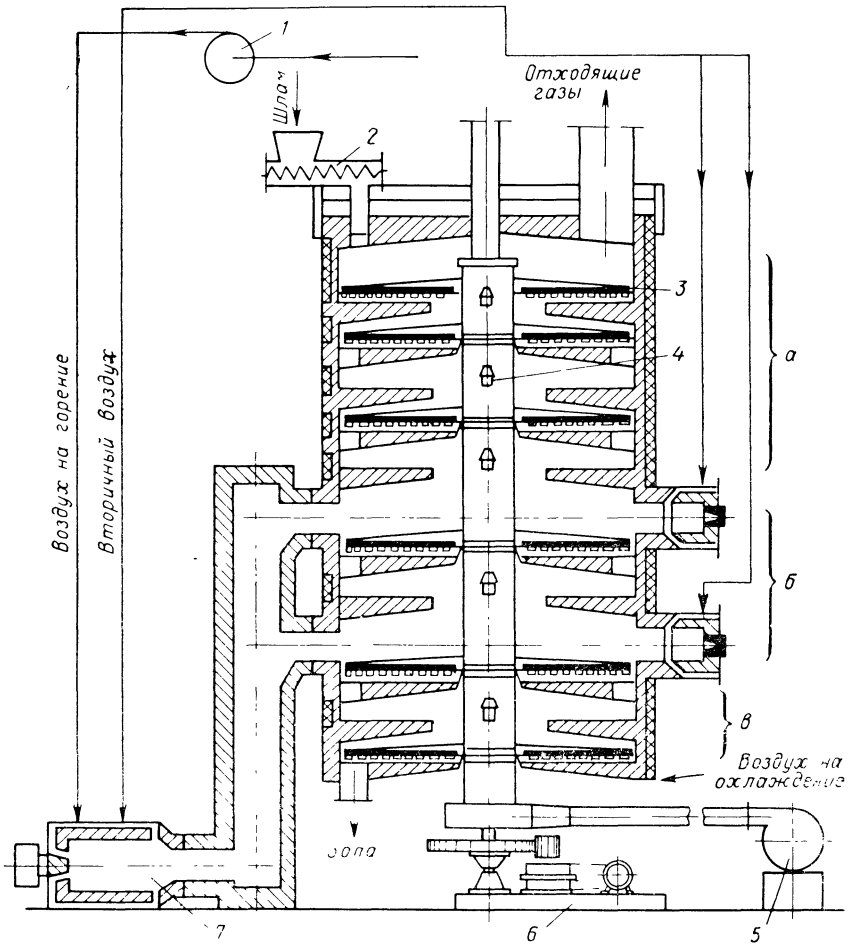


Рис. 91. Печь полочная для сжигания шламов:
1 — вентилятор; *2* — штек; *3* — грибки; *4* — вал; *5* — вентилятор; *6* — механизм привода; *7* — топка.

с полки на полку, проходя через те же отверстия в подах, по которым сыплется шлам. Через отверстие в своде верхней полки газы удаляются из печи.

Использование тепла отходящих газов для сушки шламов уменьшает общий расход топлива. Температура в зоне сушки колеблется от 250 до 500 °С в зависимости от типа печи, а температура слоя шлама в верхних полках печи определяется по закономерностям, известным в технике сушки.

Пока испаряется вода, температура шлама остается постоянной (температура мокрого термометра).

Высушенный шлам из зоны сушки поступает в зону сжигания. В начале горения температура скачкообразно возрастает практически во время пересыпания материала с полки на полку и достигает температуры, наблюдающейся в зоне горения. В результате быстрого перехода от температуры испарения к температуре горения устраняется швелевание (полукоксование), а следовательно, устраняются и связанные с этим запахи.

В зоне горения поддерживается температура, необходимая для сжигания органических веществ, т. е. от 800 до 900 °С.

Температура газов в зоне сжигания не должна превышать 1100 °С, что обусловливается особенностями конструкции печи, а также стремлением избежать размягчения шлака.

Зола из зоны сжигания поступает в зону охлаждения. Здесь она охлаждается до 300 °С воздухом, подаваемым из полого вала. Воздух отнимает тепло золы и поступает в зону сжигания. Зола с нижней полки зубьями мешалки передвигается к периферии и через отверстие удаляется из печи.

Расход тепла для испарения воды и перегрева пара, а также для эндотермических реакций расщепления твердых веществ (такие реакции нередко протекают во время разогрева), как правило, не покрывается за счет тепла, получающегося от сжигания органических веществ шлама.

С целью снижения производственных расходов следует всегда стремиться к возможно более низкому содержанию воды в шламе и возможно более высокому удельному содержанию органических веществ в сжигаемых стоках.

В табл. 34 приведены некоторые расходные коэффициенты печей для сжигания шлама.

Таблица 34

Типовые технические характеристики печей для сжигания шлама

Печь	Содержание воды, %	Температура отходящих газов, °С	Удельный расход тепла, кДж/кг испаряемой воды	Содержание горючих веществ в шламе, кДж на 1 кг испаряемой воды
Многополочная, 6 полок, внутренний диаметр 2,5 м	74	500	9500—10 000	3000
Многополочная, 5 полок, внутренний диаметр 4 м . .	75	400	6300	300
Многополочная, 10 полок, внутренний диаметр 6 м . .	80	250	4800	1450
Многополочная, 12 полок, внутренний диаметр 7 м . .	53	250 350	4600 5500	2100

Печи для сжигания сточных вод. *Печи камерные* (горизонтальные, вертикальные, циклонные) для сжигания сточных вод являются наиболее распространенными, хотя по своей громоздкости и некоторым другим показателям уступают печам с кипящим и движущимся слоем.

По принципу работы камерные печи можно разделить на два типа:

а) печи простые — где распыливание и обезвоживание сточных вод производится без возмущения их дымовыми газами или вторичным воздухом, подаваемым на дожигание органической составляющей стока;

б) печи циклонные — распыливание и обезвоживание стока производится в камере в закрученном потоке дымовых газов или вторичного воздуха.

Простые камерные печи по конфигурации камеры можно разделить на два вида: прямоугольные и цилиндрические; циклонные печи выполняют только цилиндрическими. В промышленности применяют как вертикальные, так и горизонтальные цилиндрические печи.

В камерных печах в качестве дополнительного топлива применяется как жидкое, так и газообразное, а в циклонных — преимущественно газообразное.

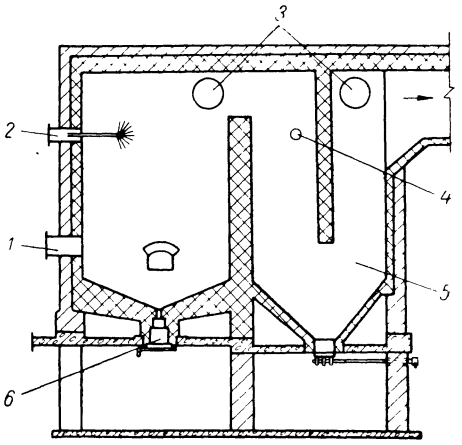


Рис. 92. Печь камерная для сжигания сточных вод:

1 — форсунка для мазута; *2* — форсунка для распыливания стоков; *3* — взрывной клапан; *4* — люк для термопары; *5* — камера для осаждения летучей золы; *6* — затвор для удаления жидкой золы.

Конструкция простой печи с прямоугольной камерой сжигания сточных вод на жидком или газообразном топливе приведена на рис. 92.

Печь представляет собой прямоугольную камеру, разделенную двумя перевальными стенками, выполненную из шамотного кирпича класса А и теплоизолированную красным кирпичом.

Дополнительное топливо, мазут или газ — распыливается газомазутной горелкой *1*, установленной на нижней части торцевой стенки первой камеры. Сточные воды распыливаются форсункой *2*, расположенной в верхней части торцевой стенки печи. Капли распыленных сточных вод падают вниз на факел и раскаленные дымовые газы. Здесь происходит обезвреживание стока, расплавление минеральных солей и частичное окисление органической составляющей стока. Для увеличения времени пребывания парогазовой смеси в печи и дожигания органического сухого остатка установлена вторая перевальная стенка.

Полученный плав минеральных солей в первой камере стекает на подину печи и через люк удаляется из печи. Унесенные частицы

минеральных солей во второй или третьей камере осаждаются, опускаются вниз и удаляются через второй люк.

Для обеспечения безопасности работы от взрыва газовоздушной смеси в период пуска (при работе на газообразном топливе) на боковой стенке устанавливаются взрывные клапаны. Дымовые газы удаляются из печи через канал, расположенный на задней торцевой стенке.

Для придания строительной прочности печь имеет металлический каркас, установленный на железобетонный фундамент.

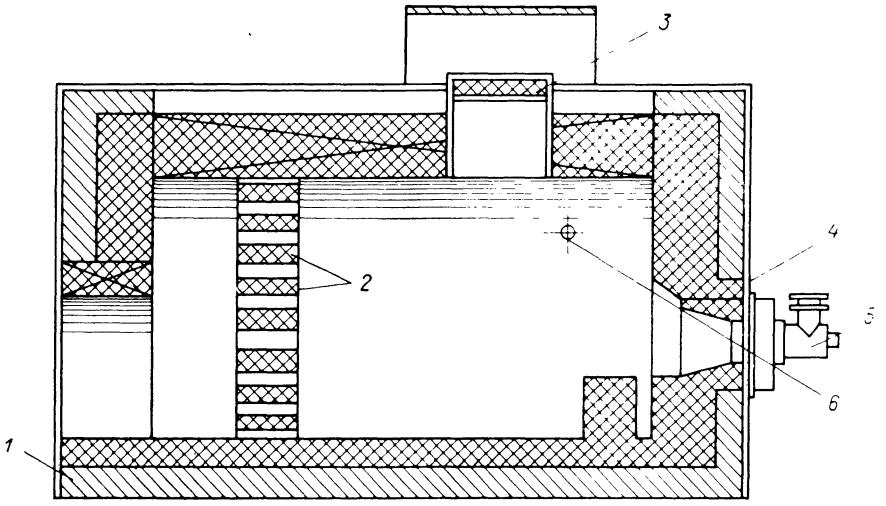


Рис. 93. Печь камерная для сжигания сточных вод:
1 — футеровка; *2* — газораспределительная решетка; *3* — взрывной клапан; *4* — кожух; *5* — горелка; *6* — форсунка для распыливания стоков.

На рис. 93 приведена конструкция простой печи малой производительности с дожигательной стенкой.

Печи циклонные. Для сжигания сточных вод типа сульфатных щелоков, которые могут гореть самостоятельно, применяется горизонтальная циклонная печь (рис. 94). Печь имеет цилиндрическую камеру, расположенную под небольшим углом к горизонту, выполненную из шамотного кирпича класса А, в качестве изоляции применен шамот-легковес. На передней торцевой стенке печи установлена горелка *1*, предназначенная для разогревания печи перед включением форсунки для распыливания сточных вод. Форсунки *6* расположены по горизонтальной оси печи. Вторичный воздух для горения органической составляющей сточных вод подается тангенциально через ряд сопел, равномерно установленных в кладке печи. Минеральные соли, содержащиеся в сточных водах, после обезвоживания стока и окисления органической составляющей расплавляются, и зола стекает к задней торцевой стенке, откуда она удаляется через специальный люк с затвором.

Для обеспечения безопасности пуска печи при работе на горючих газах в конце камеры наверху установлен взрывной клапан.

Вторичный воздух, подаваемый в печь для обеспечения устойчивого горения щелоков, должен быть нагрет до 200 °С (в зависимости от влажности щелоков). Воздух следует подавать в печь в избытке (α = 1,1—1,2). Скорость воздуха в соплах может быть принята равной 50—80 м/с.

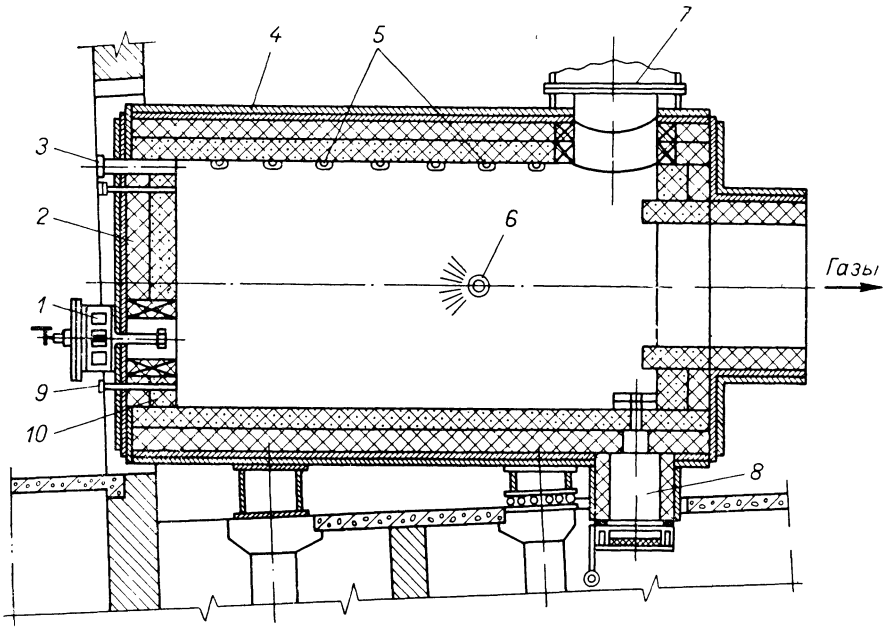


Рис. 94. Печь циклонная для сжигания сточных вод:

1 — горелка для газа и мазута; *2* — футеровка из шамотного кирпича; *3* — смотровое окно; *4* — кожух; *5* — сопла для тангенциального ввода вторичного воздуха; *6* — форсунка для распыливания сточных вод; *7* — взрывной клапан; *8* — камера с затвором для удаления жидкой золы; *9* — люк для приборов; *10* — футеровка из хромомагнезитового кирпича.

Распыливание щелоков производится форсункой при помощи сжатого воздуха или пара, имеющего давление 0,6 МПа.

Дымовые газы удаляются из печи через цилиндрический канал, расположенный по оси задней торцевой стенки.

Для наблюдения за процессом сжигания внутри камеры на передней торцевой стенке установлены смотровые окна.

Кладка печи заключена в металлический кожух, который создает строительную прочность и герметичность печи. На специальных подставках печь устанавливается на железобетонную фундаментальную колонну. Одна из подставок установлена на роликах, чтобы была возможность удлинения печи при нагреве без деформации кладки и каркаса.

Большой интерес представляет конструкция циклонной печи для сжигания кубового остатка с одновременным получением соли в виде плава в производстве карбофоса (рис. 95).

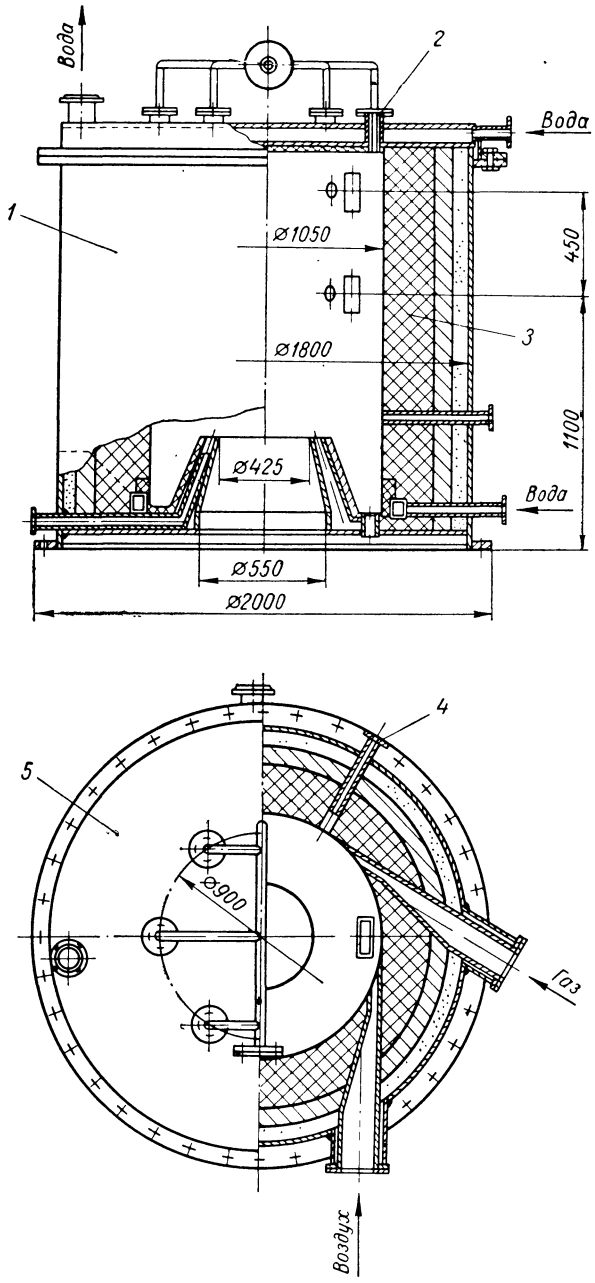


Рис. 95. Печь циклонная для сжигания кубового остатка:

1 — каркас; *2* — форсунка для подачи кубового остатка; *3* — футеровка; *4* — запальник; *5* — крышка водоохлаждаемая.

Печь имеет цилиндрическую форму; она футерована шамотным кирпичом класса А, шамотом-легковесом и теплоизолирована диатомовым порошком. Внутренняя поверхность покрыта хроматомагнезитовой обмазкой. Подина имеет форму усеченного конуса и охлаждается водой. Печь заключена в металлический кожух из листовой стали. На верхней и нижней частях кожуха приварены фланцы. Верхний фланец предназначен для болтового скрепления разъемной крышки, а нижний — для скрепления печи с дымоотводящим боровом. Разъемная крышка изготовлена из листовой стали. На нижней поверхности крышки нанесена огнеупорная обмазка. Крышка охлаждается водой. Кубовой остаток в печь подается 6 форсунками, установленными на крышке печи.

Оригинально организовано горение топливного газа. Топливный газ и воздух на горение и разбавление вводится в камеру печи тангенциально. Сгорание газовоздушной смеси происходит в закрученной среде, на которую сверху подается кубовой остаток.

В печи происходит обезвоживание стока, окисление органической составляющей и расплавление солей.

Плав NaCl стекает по стенке печи к кольцеобразному поду, откуда он удаляется через специально установленные отверстия.

Техническая характеристика печи:

Характер работы	Непрерывный
Производительность по кубовому остатку	600 кг/ч
Производительность по соли	75 кг/ч
Топливо	Попутный газ Мухановского месторождения
Теплотворная способность топлива	45 209 кДж/м³
Давление газа перед соплом	2000 Па
Давление воздуха перед соплом	4500 Па
Расход газа	120 м³/ч
Расход воздуха	2500 м³/ч
Скорость газа на входе в печь	10 м/с
Скорость воздуха на входе в печь	100 м/с
Температура дымовых газов на выходе из печи	1000 °С
Теплонапряжение в печи	1512 кВт/м³
Расход воды на охлаждение пода	5 м³/ч
Расход воды на охлаждение крышки	6,3 м³/ч
Температура воды на входе	20 °С
Температура воды на выходе	30 °С
Давление в печи	900 Па

По конструкции циклонные вертикальные печи для термического обезвреживания сточных вод (рис. 96 и 97) представляют собой вертикальные цилиндры, футерованные шамотным кирпичом класса А, шамотом-легковесом и теплоизолированные в одних случаях диатомовым кирпичом, в других — красным кирпичом. Во всех приведенных конструкциях, как правило, печи имеют два огневых пояса и два пояса распыливания сточных вод. Пояс распыливания сточных вод всегда располагается над огневым поясом.

Газовые горелки располагаются тангенциально и при работе печи создают закрученный поток раскаленных дымовых газов,

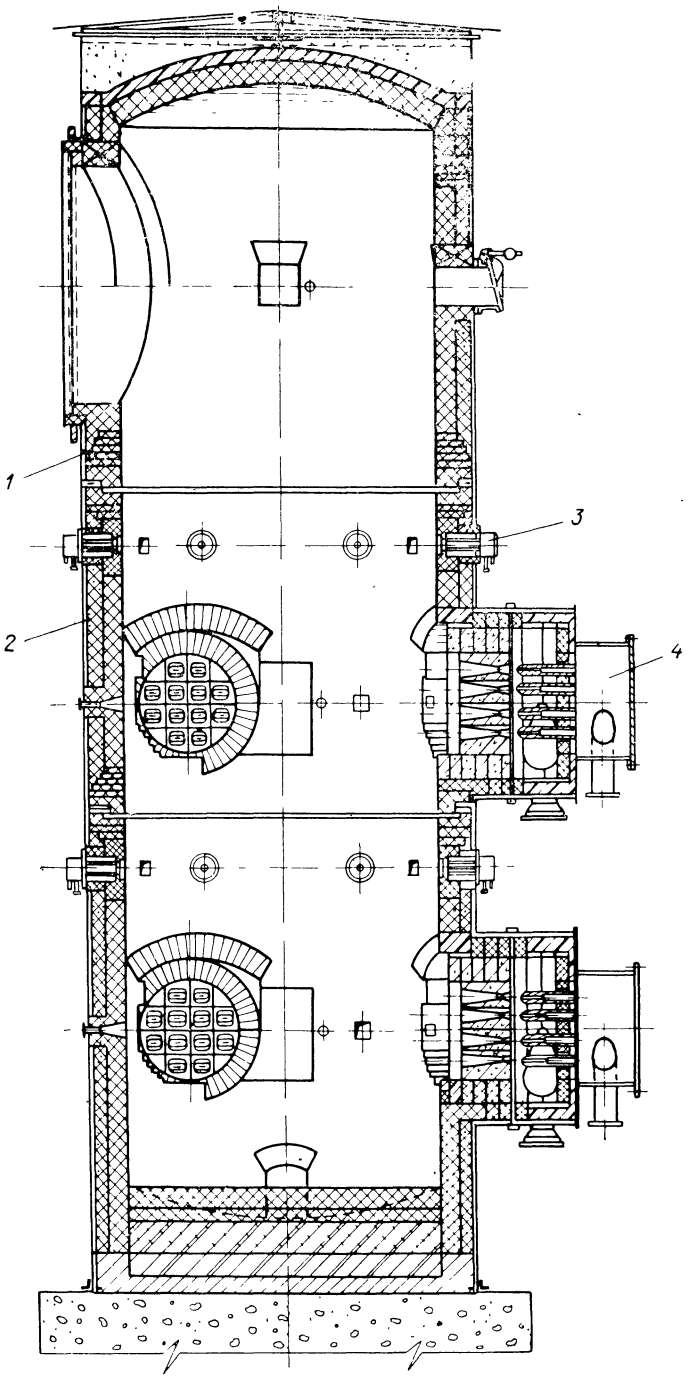


Рис. 96. Печь циклонная вертикальная:

кожух; *2* — футеровка; *3* — форсунка для подачи сточных вод; *4* — горелки д

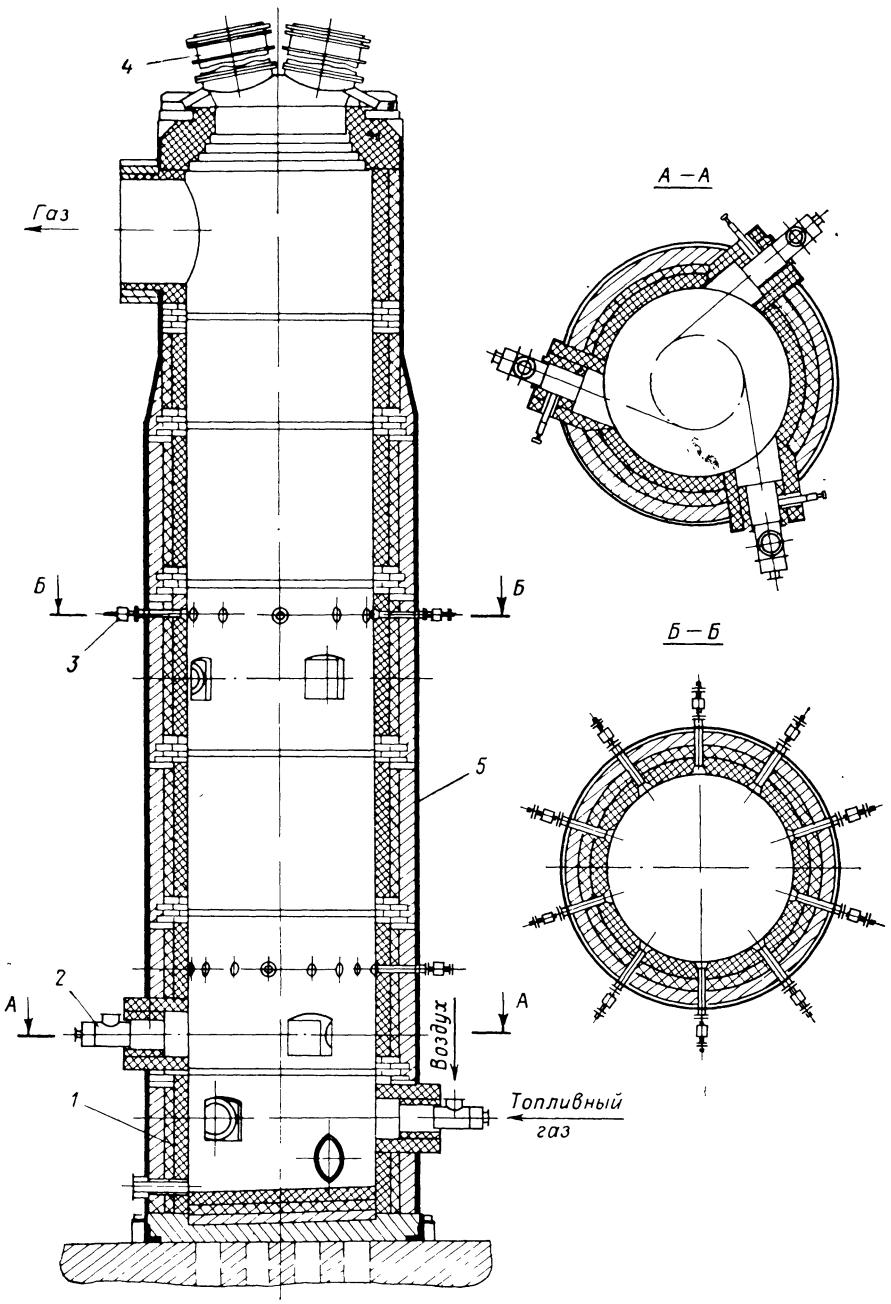


Рис. 97. Печь циклонная вертикальная:

1 — футеровка; *2* — горелка для газов; *3* — форсунка для подачи сточных вод; *4* — взрывной клапан; *5* — кожух.

который орошается сверху каплями сточных вод, поступающих из форсунок, расположенных радиально. В объеме печи происходит обезвоживание стока, окисление органической составляющей, а при наличии минеральных солей их расплавление. Парогазовая смесь удаляется из верхней части печи через трубу.

Свод печи обычно служит взрывным клапаном. Печь заключается в металлический кожух, устанавливается на бетонный фундамент и крепится болтами. Подина печи всегда выполнена наклонной для стекания плава и его удаления. В корпусе печи в нижней части предусматриваются лазы для ремонта кладки печи.

Циклонные печи по сравнению с простыми камерными обладают целым рядом преимуществ, связанных в первую очередь с лучшей организацией смешения воздуха с топливом, что позволяет резко увеличить теплонапряжение камеры печи без ухудшения полноты сгорания. В циклонных печах резко удлиняется процесс сжигания стоков во времени и сравнительно просто решается вопрос с выгрузкой плава.

Недостатком циклонных печей является частичный унос солевой массы, а иногда и недостаточное выгорание.

Температура отходящих газов после всех камерных печей, как правило, должна быть 800—950 °С.

Печи с кипящим слоем. В печах КС производится обезвоживание сточных вод, содержащих минеральные соли, термическое разложение обработанных минеральных кислот, сжигание нефтяного шлама и т. д. Печи КС представляют собой термореакторы, отличающиеся наличием взвешенного потоком газа слоя твердых частиц.

На рис. 98 представлена печь КС для термического обезвреживания сточных вод, содержащих сульфиды и сульфаты.

Печь КС имеет выносную топку на газовом топливе, круглую, провальную решетку диаметром 1510 мм. Подрешеточное пространство имеет коническую форму. Максимальный диаметр конической части 2600 мм. Угол раскрытия принят 22°. Сточные воды распыливаются одной механической форсункой, установленной в центре печи.

Топка печи цилиндрическая; она выполнена из высокоогнеупорного материала в два слоя и имеет тепловую изоляцию из асбестового листа. Наружная поверхность топки заключена в металлический кожух из листовой стали. Топка в конце сужается и имеет коническую форму. Кожух топки охлаждается вторичным воздухом, подаваемым вентилятором в кольцевое пространство между кладкой топки и внешним кожухом. Воздух вводится в кольцевой канал тангенциально со скоростью 5—8 м/с.

Таким образом, теплоноситель, поступающий в рабочую камеру печи КС, получается смешением дымовых газов со вторичным воздухом. Этот же теплоноситель, имеющий под решеткой температуру 700 °С и выше, является псевдоожижающим агентом.

С промежуточным патрубком топка соединена фланцами. На промежуточном патрубке установлен взрывной клапан, который

предназначен для предохранения конструкции печи от разрушения и обслуживающего персонала от травм в случае взрыва.

На промежуточном патрубке имеется лаз, необходимый для осмотра и ремонта топки.

Топливом для печи КС является природный газ. Как в рассматриваемой конструкции, так и вообще в печах с кипящим слоем

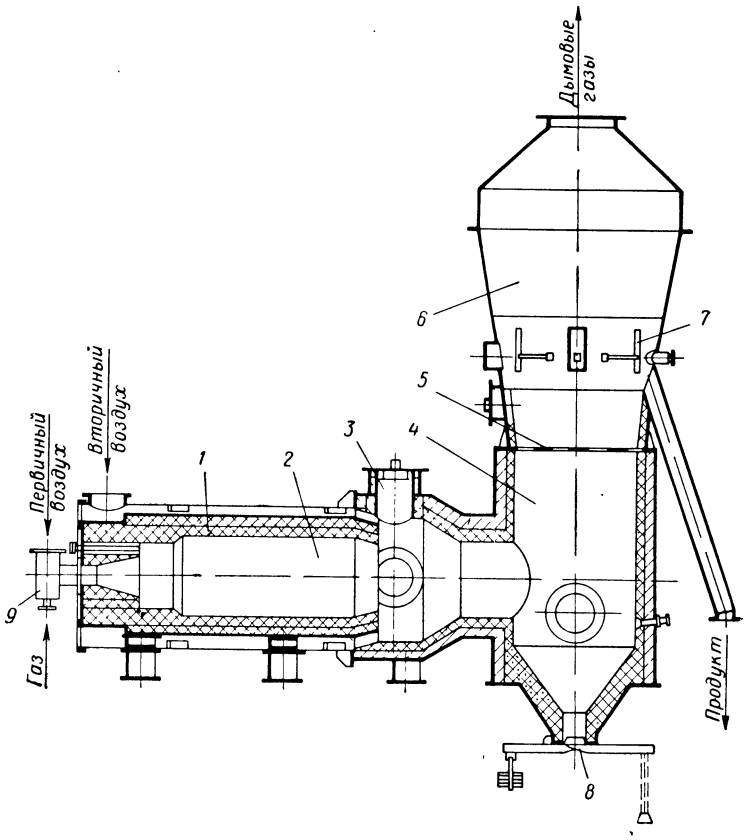


Рис. 98. Печь КС для сжигания сточных вод:

1 — футеровка; *2* — камера горения; *3* — взрывной клапан; *4* — камера смешения; *5* — газораспределительная решетка; *6* — корпус печи; *7* — форсунка для сточной воды; *8* — затвор; *9* — горелка для газа.

топка обычно должна работать под давлением, достаточным для того, чтобы теплоноситель прошел через распределительную решетку и сам кипящий слой. Поэтому для сжигания газа используются горелки, работающие под давлением. К горелкам и их установке предъявляются повышенные требования по герметичности, во избежание выбивания горячих газов через неплотности. Такие же требования предъявляются к гляделкам, расположенным в топке.

Подрешеточное пространство в рассматриваемом случае имеет цилиндрическую форму. В нижней части подрешеточного пространства смонтировано специальное разгрузочное устройство для

освобождения подрешеточного пространства от провалившихся частиц и гранул.

Распределительная решетка представляет собой металлический лист толщиной 20 мм. На листе в шахматном порядке расположены отверстия; диаметр отверстий 5 мм, шаг 18 мм. Отверстия имеют

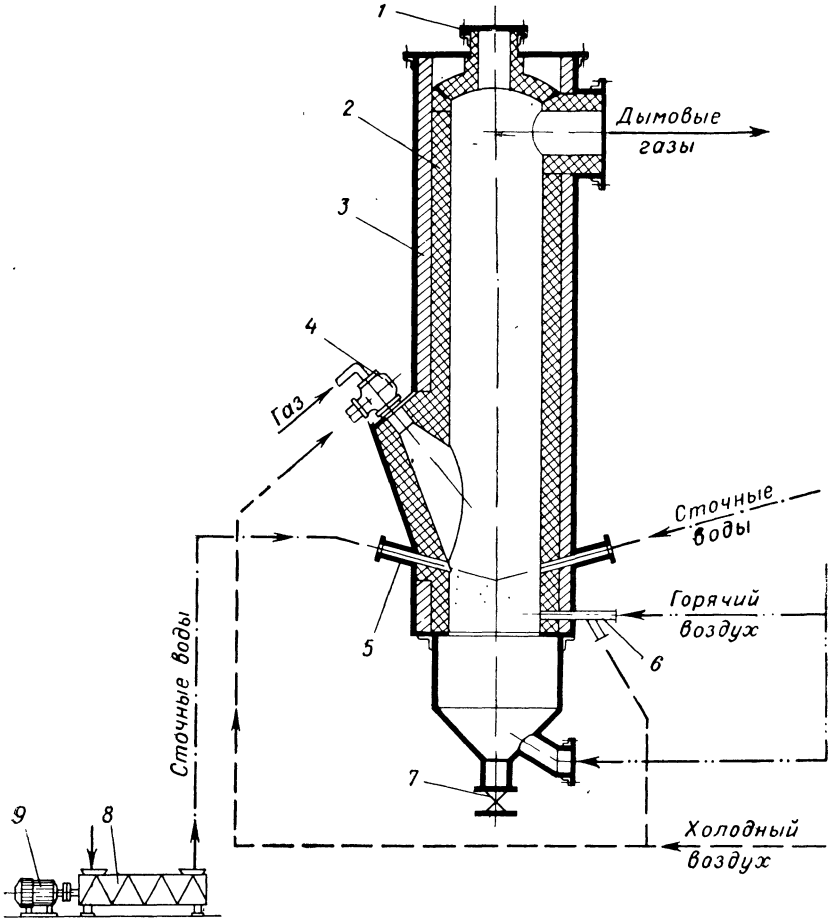


Рис. 99. Печь КС для сжигания сточных вод и шламов:

1 — взрывной клапан; *2* — огнеупорная футеровка; *3* — теплоизоляционная футеровка; *4* — горелка для газа; *5* — форсунка для подачи сточных вод или шлама; *6* — горелка для подслойной подачи газа; *7* — затвор; *8* — шнек; *9* — электродвигатель.

цилиндро-коническую форму, обращенную расширением вверх. Ввиду интенсивного отвода тепла кипящим слоем специального охлаждения решетка не требует.

Помимо описанной применяются также другие конструкции решеток. С нашей точки зрения целесообразно разделить решетки на провальные (пример такой решетки был описан) и беспровальные.

На рис. 99 приведена конструкция печи КС, в которой обезвреживание сточных вод и шламов производится на «подушке» твердого материала, обычно кварцевого песка. Такие печи обычно не имеют топки и сжигание топлива происходит в слое.

Печь для сжигания отходящих газов. Из рудно-термических фосфорных и карбидных печей отходят газы, содержащие токсичные вещества и имеющие высокую теплотворную способность. Их можно использовать как топливо, а избыток следует сжигать. Подлежат сжиганию и газы других производств,

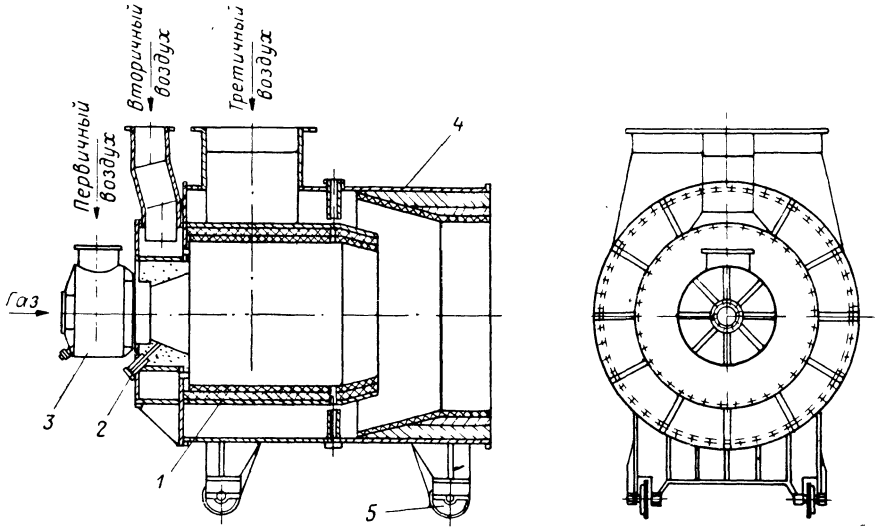


Рис. 100. Печь для сжигания избытка печных газов от фосфорных печей:
1 — футеровка; *2* — запальник; *3* — горелка; *4* — кожух; *5* — каток.

которые также содержат токсичные вещества, но их можно окислить до безвредных веществ.

Печь камерная. На рис. 100 приведена конструкция камерной печи для сжигания избытка печных газов от фосфорных печей. Топливом является печной газ, который сжигается в специальной газовой керамической горелке (см. стр. 360). Вторичный воздух подается в камеру горения через круглые отверстия, расположенные внутри горелки. Отходящие из камеры горения дымовые газы разбавляются третичным воздухом, отбираемым из печного цеха. Третичный воздух обдувает наружную поверхность камеры горения. Футеровка печи выполнена из шамотного кирпича и заключена в металлический кожух, который опирается на четыре катка, передвигающихся по рельсам, что позволяет при нагревании расширяться печи и работать без компенсатора.

Печь рассчитана на сжигание от 450 до 4500 м³/ч печного газа с теплотворностью 10—12 кДж/м³. Последняя зависит от состава газа.

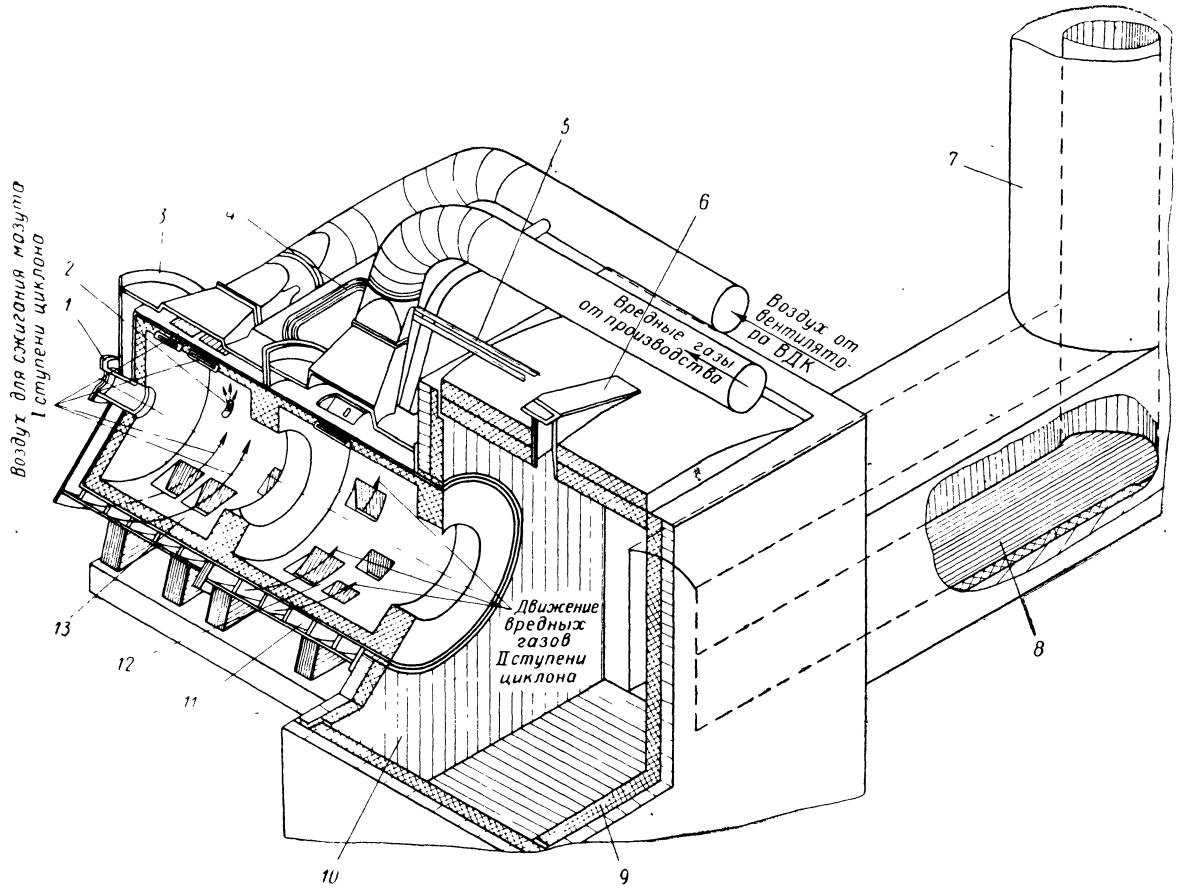


Рис. 101. Печь циклонная для сжигания токсичных отходящих газов:

1 — гляделка; *2* — форсунка для мазута; *3* — кожух; *4* — трубопровод сжатого воздуха; *5* — мазутопровод; *6* — взрывной клапан; *7* — дымовая труба; *8* — боров; *9* — футеровка; *10* — камера дожигания; *11* — камера токсичных газов; *12* — II ступень циклона; *13* — I ступень циклона.

Керамическая горелка оснащена автоматическим запальником, к которому подводится природный газ, а в камере сжигания устанавливается прибор для контроля за пламенем: в случае погасания пламени отключается подача печного газа. Для горения печного газа в горелку подают первичный воздух с избытком ($\alpha = 1{,}3$), затем полученную смесь сжигают в камере. Вторичный воздух подают также с избытком ($\alpha = 3{,}2$). Объем отходящих газов из печи составляет 256 000—300 000 м³/ч.

Печь циклонная. На рис. 101 приведена конструкция циклонной печи для сжигания отходящих токсических газов, содержащих органические вещества.

Печь состоит из двух циклонных камер. В I камере происходит сжигание жидкого топлива — мазута, подаваемого тангенциально в камеру горения. Воздух на горение подается также тангенциально. В загруженном потоке происходит сжигание мазута и получение высокотемпературного теплоносителя, который поступает во II циклонную камеру. Во II камере происходит сжигание токсических газов высокотемпературным теплоносителем. Эти газы тангенциально поступают в камеру сжигания. Отходящие газы дожигаются в камере дожигания и удаляются через боров.

Печь футерована шамотным кирпичом класса А и заключена в металлический кожух и каркас.

Методика расчета печей для сжигания промышленных отходов. Количество необходимого топлива для сжигания промышленных отходов определяется расчетом. Задаваясь тепловой нагрузкой печи, находят его объем и размеры. Общая формула для расхода топлива в печах сжигания стоков, которые не могут гореть самостоятельно, имеет следующий вид:

$$B_{уд} = \eta \frac{V'_г c_г t_{ух.\ г} + I + \frac{w}{100} + G_з (c_з t_з + q_{пл.\ з}) - \left[Q^с_н + a V'_{возд} c_{возд} t_{возд} \right]}{Q^р_н + a V_{возд} c_{возд} t_{возд} - V_г c_г t_{ух.\ г}}$$

где $B_{уд}$ — удельный расход топлива, кг/кг отходов; η — коэффициент, учитывающий неучтенные потери (применяется 1,1); $V'_г$ — объем газов, образующихся от сжигания отходов и уходящих из печи, м³/кг отходов; $c_г$ — теплоемкость уходящих из печи газов, кДж/(м³·°С); $t_{ух.\ г}$ — температура уходящих из печи газов, °С; I — энтальпия паров воды при $t_{ух.\ г}$, кДж/кг; w — влажность отходов, %; $G_з$ — количество золы в 1 кг отходов, кг; $c_з$ — теплоемкость золы, кДж/(кг·°С); $t_з$ — температура золы, °С; $q_{пл.\ з}$ — удельная теплота плавления золы, кДж/кг; $Q^с_н$ — низшая теплотворная способность отходов, кДж/кг; α — коэффициент избытка воздуха, ($\alpha = 1{,}2$); $V'_{возд}$ — теоретически необходимое количество воздуха для сжигания 1 кг отходов, м³/кг; $c_{возд}$ — теплоемкость воздуха, кДж/(м³××°С); $Q^р_н$ — низшая теплотворная способность топлива, кДж/кг; $V_{возд}$ — теоретически необходимое количество воздуха для сжигания 1 кг топлива, м³/кг; $V_г$ — объем газов, образующихся от сжигания 1 кг топлива, м³/кг.

На рис. 102 представлен график удельного расхода условного топлива на 1 т отходов в зависимости от влажности и температуры уходящих газов при разных ω.

Удельный объем камеры печи, где происходит сжигание токсичных и промышленных отходов, может быть определен по следующей эмпирической формуле. Для камерных печей:

$$V_к = \frac{2T^4_{гор} \cdot 10^{-2e(100-\omega)/100} \theta^2_{ух.\ г}}{a_V (t_{ср} - 100)^{2{,}6}}$$

где $V_к$ — удельный объем камеры для сжигания 1 м³ раствора, м³; $T_{гор}$ — теоретическая температура горения топлива, К; $\theta_{ух.\,г}$ — безразмерная величина, характеризующая отношение $T_{ух.\,г}/T_{гор}$ (здесь $T_{ух.\,г}$ — температура уходящих газов, К); a_V — объемный коэффициент теплообмена, кВт/(м³·°С).

Объемный коэффициент теплообмена рассчитывают по формуле:

$$a_V = 6{,}43 \cdot 10^{-3} \left(\frac{G_р}{V_к}\right) e^{-0{,}5(100-\omega)/100} (\varepsilon\theta)^{1{,}5}$$

где $G_р$ — количество раствора, кг; $V_к$ — объем камеры, м³; ε — степень черноты газа в печи;

$$\theta = \frac{\left(\frac{T_{ср}}{100}\right)^4 - \left(\frac{373}{100}\right)^4}{t_{ср} - 100}$$

$T_{ср}$ — средняя температура в печи, К; $t_{ср}$ — среднее арифметическое значение средней температуры газа, °С.

Значения a_V определяют в зависимости от влажности при $t_{ух.\,г}$ 800 °С.

Влажность, %	100	90	80	70	60	50
a_V, Вт/(м³·С)	95	86	77	69	60	51

Для инженерных расчетов вполне достаточные удельные объемы печи можно получить, используя схему (рис. 103).

Глубина печи l принимается по длине факела распыления отходов или топлива, ширина b по диаметру факела (одного или двух), так, чтобы жидкость не попадала на стенки. Распыление отходов приводят под давлением 0,3 МПа. Ширина печи при одной форсунке должна быть 2,5—3,0 м; высоту печи (в м) определяют из уравнения:

$$h = \frac{V}{lb}$$

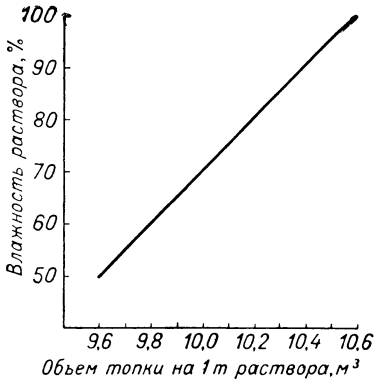


Рис. 102. Зависимость объема печи от влажности раствора.

Для стоков, которые могут гореть самостоятельно как влажное топливо, при теплотворности 8,4 МДж/кг, объем циклонной печи определяют из следующей формулы:

$$V_т = \frac{BQ^р_н}{g}$$

где $V_г$ — объем топки, м³; B — расход стоков, кг/м³; $Q^р_н$ — теплотворность стоков, кДж/кг; g — тепловое напряжение топочного объема, Вт/м³ (1200—2200 Вт/м³).

По объему камеры горения определяют длину печи l и диаметр $D_п$ из соотношения:

$$\frac{l}{D_п} = 1{,}4 \div 1{,}7$$

Диаметр выходного отверстия для отходящих газов ($d_{вых}$) находят из соотношения $d_{вых}/D_п = 0{,}4$.

Реакционный объем вертикальных цилиндрических печей, необходимый для сжигания стоков, может быть определен из допустимой влагонапряженности по формуле:

$$V_п = G/W$$

где G — количество сточных вод, кг/ч; W — влагонапряженность по сточным водам, кг/(м³·ч) [(может быть принята 35 кг/(м³·ч)].

Площадь сечения печи $F_п$ может быть определена: а) по допустимой скорости отходящих газов:

$$F_п = V_г / u$$

где $V_г$ — площадь сечения печи, м²; u — скорость движения отходящих газов, м/с (может быть принята равной 0,6—1,0 м/с); б) по плотности орошения сечения шихты A:

$$F_п = G / A$$

Плотность орошения сечения печи A может быть принята до 0,1 кг/(м²·с).

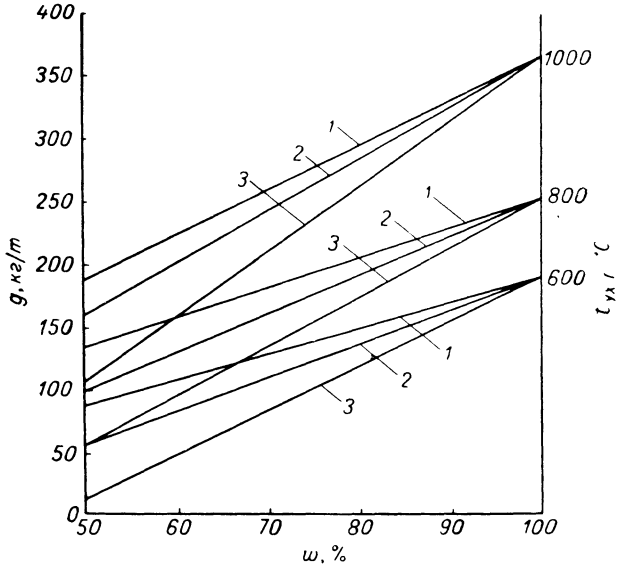


Рис. 103. Зависимость удельного расхода условного топлива от влажности:

1 — $Q_н^с = 12{,}56$ кДж; 2 — $Q_н^с = 25{,}12$ кДж; 3 — $Q_н^с = 50{,}24$ кДж

Диаметр печи $D_п$ определяют по формуле:

$$D_п = \frac{F_п}{0{,}785}$$

Высота печи $H_п$ (в м) будет равна:

$$H_п = V_п / F$$

Для сгорания всех органических веществ стока в печи необходимо поддерживать температуру отходящих газов равной 800—950 °С. При наличии солей, например, Na_2SO_4, NaCl, $CaCl_2$ и других, их следует выводить из печи в расплавленном состоянии. Температура отходящих газов в этом случае принимается на 50—100 °С выше температуры плавления. При наличии загрязнений с высокой температурой плавления соли можно выводить в твердом состоянии.

Печи ремонтных цехов

На химических заводах для проведения ремонта оборудования имеются ремонтные цеха. Для проведения кузнечных работ или термической обработки изготовленных металлических деталей

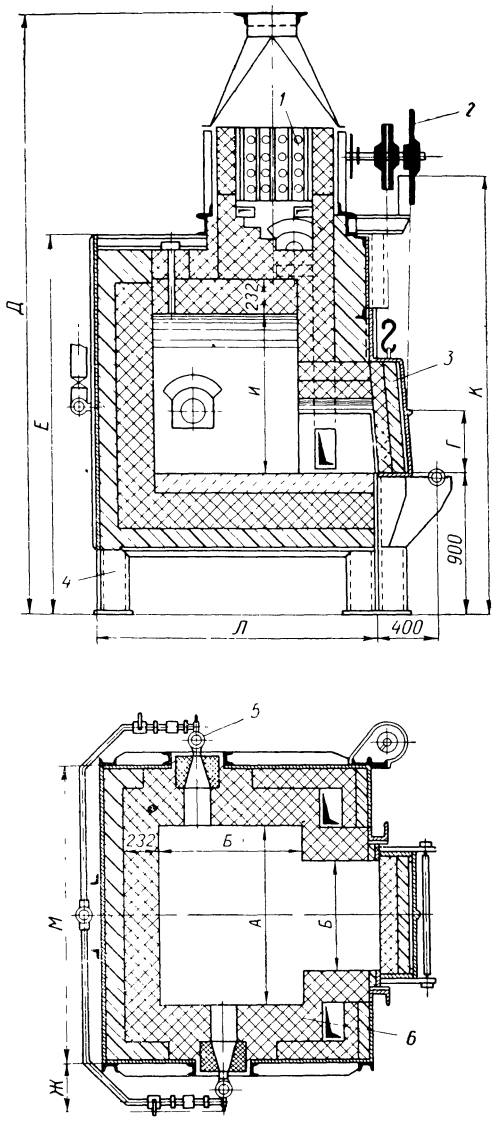


Рис. 104. Печь нагревательная, камерная переносная:

1 — рекуператор «термоблок»; *2* — шкивы; *3* — механизм подъема заслонки; *4* — каркас; *5* — форсунка для мазута; *6* — футеровка.

Таблица 35

Техническая характеристика и конструктивные размеры типовых нагревательных печей

Типоразмер печи	Размеры, мм											Площадь пода, м²	Топливо	Нормальная производительность, кг/ч	Напряжение пода печи, кг/(м².ч)	Температура нагревания металла, °С	Расход топлива, кг/ч
	пода		рабочего окна														
	ширина *А*	глубина *Б*	ширина *В*	глубина *Г*	*Д*	*Е*	*Ж*	*И*	*К*	*Л*	*М*						
I	580	580	464	308	3379	2000	550 700	669 669	2390	1468	1192	0,34	Мазут Газ низкого давления Газ высокого давления	90 75 75	265 220 220	 1200 1150	10 90 100
II	812	580	580	324	3369	2090	550 700	769 699	2390	1364	1534	0.47	Мазут Газ низкого давления Газ высокого давления	140 120 120	300 250 250	 1200 1150	15 140 155
III	1044	696	696	410	3783	2350	450 670 410	939 869 754	2700	1480	1766	0,73	Мазут Газ низкого давления Газ высокого давления	300 220 220	410 300 300	 1200 1150	30 280 300
IV	1160	928	696	480	3853	2400	475 770	1019 949	2940	1766	2132	1,08	Мазут Газ низкого давления Газ высокого давления	540 380 380	500 350 350	 1200 1150	54 480 510

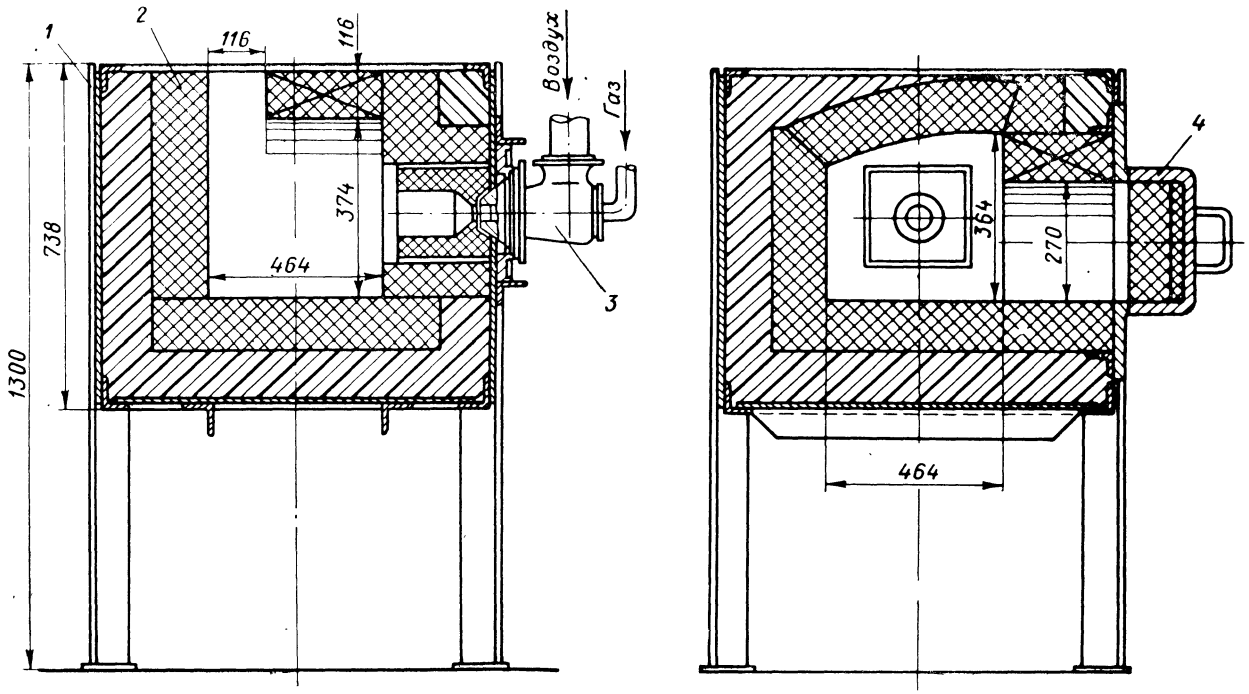


Рис. 105. Печь-горно:
1 — каркас; *2* — футеровка; *3* — горелка; *4* — дверца.

ремонтные цехи оборудуются камерными нагревательными печами и печами-горно.

На рис. 104 показана типовая конструкция переносной нагревательной печи. Серия нагревательных печей состоит из четырех типоразмеров, характеристика которых приведена в табл. 35.

Камерные переносные печи для нагревания заготовок перед ковкой до 1200—1250 °С выполняются из шамотного и диатомового кирпича, а под — из талькомагнезитового кирпича. Кладка заключена в каркас из профильного проката и обшита листовой сталью толщиной 4 мм.

Печи снабжены ручными, секторными или цепными механизмами подъема заслонки. Печи оборудованы рекуператорами типа «термоблок», установленными на печи. Для сжигания топлива установлены две горелки или форсунки, смещенные друг относительно друга в горизонтальных осях. Отвод дыма из рабочей камеры осуществляется посредством двух каналов, расположенных в передней торцевой стенке печи, вход дыма в каналы с боковых сторон оконного проема. У входа в рекуператор каналы объединяются в один общий канал. Пройдя рекуператор, дымовые газы через трубу выбрасываются в атмосферу.

На рис. 105 приведена конструкция печи-горно, которая обеспечивает нагревание мелких деталей для ковки, нагревание труб, проката для гнутья. Печь-горно имеет небольшие размеры, она обеспечена горелкой ГНП-3. Дымовые газы отводятся под колпак или в помещение цеха. Загрузка деталей в печь производится через рабочее окно. Изделия для гнутья устанавливаются сверху печи над щелью.

Глава III

ТОПКИ

Установки, предназначенные для сжигания топлива с целью получения теплоносителя необходимых параметров, используемого в различных печах (печи с вращающимся барабаном, шахтных многосекционных печах в производстве катализаторов, печах КС и др.), называются топками. Топки должны удовлетворять следующим основным требованиям:

1) обеспечивать полное сжигание топлива и высокую экономичность его использования, и процесс горения должен поддаваться регулированию;

2) надежны и достаточно просты для монтажа и обслуживания;

3) безопасны в эксплуатации;

4) достаточно дешевы.

Топки могут быть классифицированы по следующим признакам:

по сжигаемому топливу — газовые и мазутные;

по форме — прямоугольные, цилиндрические, циклонные;

по расположению — отдельно стоящие и встроенные;

по направлению движения теплоносителя — вертикальные, горизонтальные и угловые;

по гидравлическому режиму — напорные и работающие под разрежением.

КОНСТРУКЦИИ ОТДЕЛЬНО СТОЯЩИХ ТОПОК

На рис. 106 приведена топка для сжигания мазута, она имеет прямоугольное сечение с циркульным сводом. Топка имеет две камеры — камеру горения мазута и камеру разбавления дымовых газов вторичным воздухом до требуемых температур. Ее футеруют шамотным кирпичом класса А и теплоизолируют диатомовым кирпичом. Топка заключена в металлический кожух. Распыливание мазута производится в форсунке, установленной на боковой стенке топки за счет первичного воздуха. Для лучшей организации горения установлена шамотная горка. В камере горения предусмотрен лаз для ремонта, а в камере разбавления имеются отверстия для отвода дымовых газов в период растопки и в период предотвращения замазывания сажей основного технологического оборудования. На рис. 107 показана аналогичная конструкция топки, но с высокой камерой горения.

На рис. 108 показана конструкция круглой топки, футерованной из фасонных огнеупорных блоков. Вторичный воздух на разбавление дымовых газов подается через отверстия в блоках, рассосредоточенных по кольцевой внутренней поверхности и по всей длине камеры

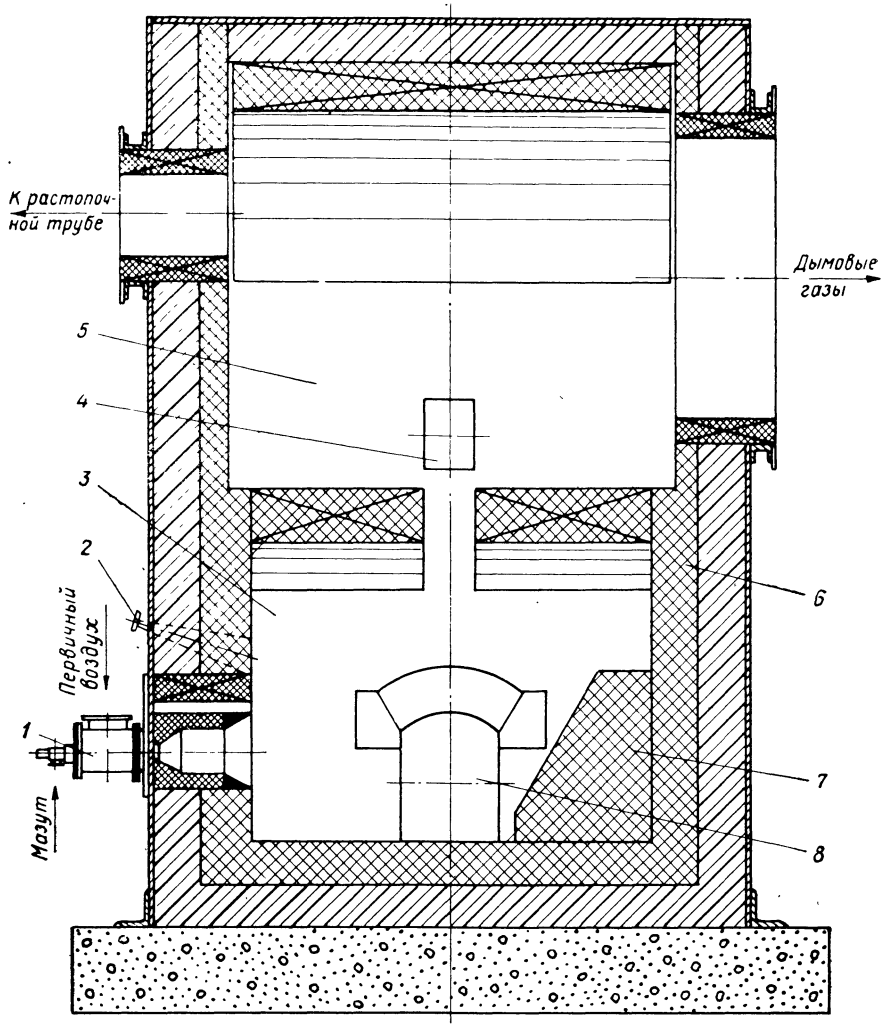


Рис. 106. Топка прямоугольная для сжигания мазута:
1 — форсунка; *2* — гляделка; *3* — камера горения; *4* — канал для вторичного воздуха; *5* — камера смешения; *6* — футеровка; *7* — шамотная горка; *8* — лаз.

Сжигание топлива и его разбавление производится в одной камере. Вторичный воздух, подаваемый в камеру горения, одновременно охлаждает наружный корпус топки.

На рис. 109 показана круглая топка. Камера горения в этой топке находится в центре; вторичный воздух подсасывается из

регулируемых отверстий на фронтовой плите за счет разрежения. Разбавление дымовых газов вторичным воздухом осуществляется в отдельной камере смешения. Вторичный воздух одновременно охлаждает и наружный корпус топки. Камеры горения и разбавления футерованы огнеупорным кирпичом класса А. На металлическом

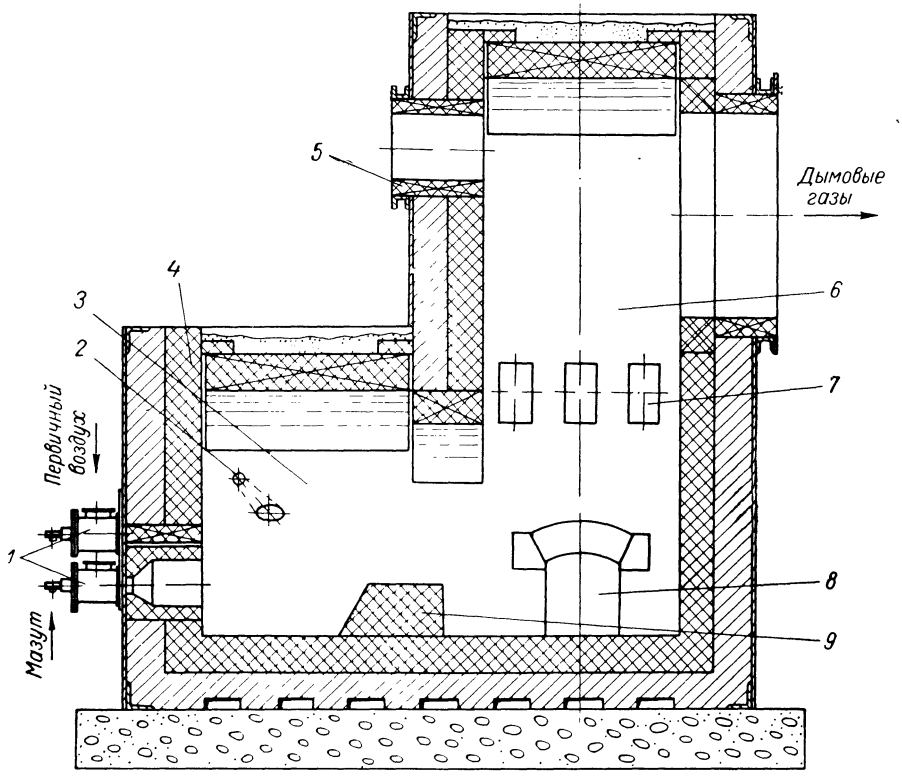


Рис. 107. Топка прямоугольная для сжигания мазута с выносной камерой горения:

1 — форсунка; *2* — гляделка; *3* — камера горения; *4* — футеровка; *5* — патрубок к растопочной трубе; *6* — камера смешения; *7* — канал для вторичного воздуха; *8* — лаз; *9* — шамотная горка.

кожухе топки имеются опоры, которыми она устанавливается на фундамент.

На рис. 110 приведена конструкция циклонной топки, где газовоздушная смесь из горелки и вторичный воздух вводятся тангенциально к стенке камеры горения. Отвод теплоносителя осуществляется через отверстие, расположенное в центре торцевой стенки топки. При таком конструктивном оформлении осуществляется интенсивное перемешивание газовоздушного потока и получение теплоносителя одинаковой температуры по всему объему. Топка компактна и показывает хорошие эксплуатационные качества. Топка футеруется огнеупорным кирпичом класса А и заключается

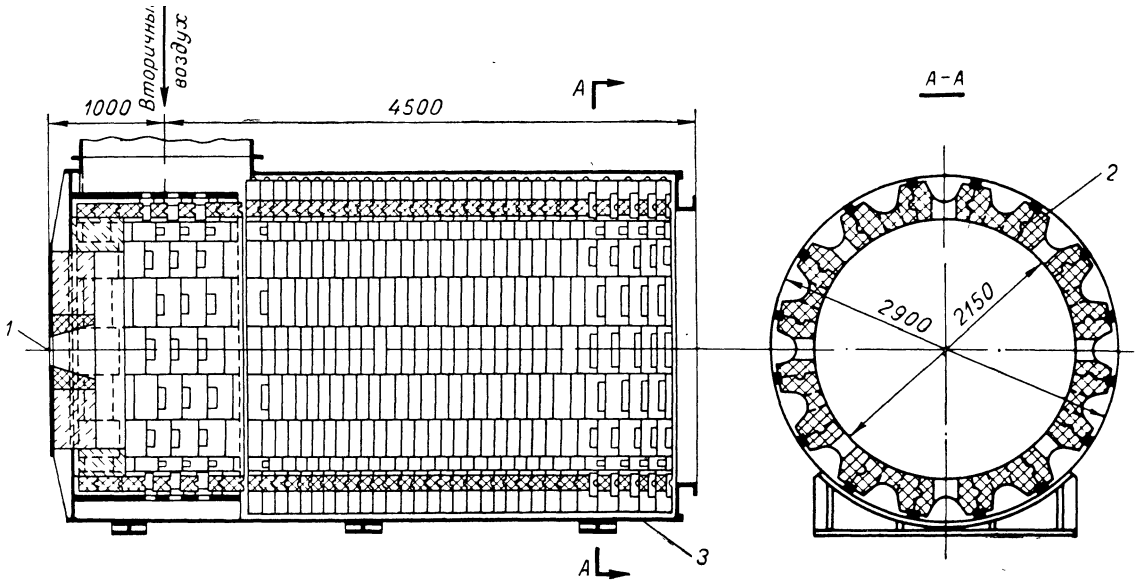


Рис. 108. Топка круглая:
1 — горелка; *2* — фасонный кирпич; *3* — кожух.

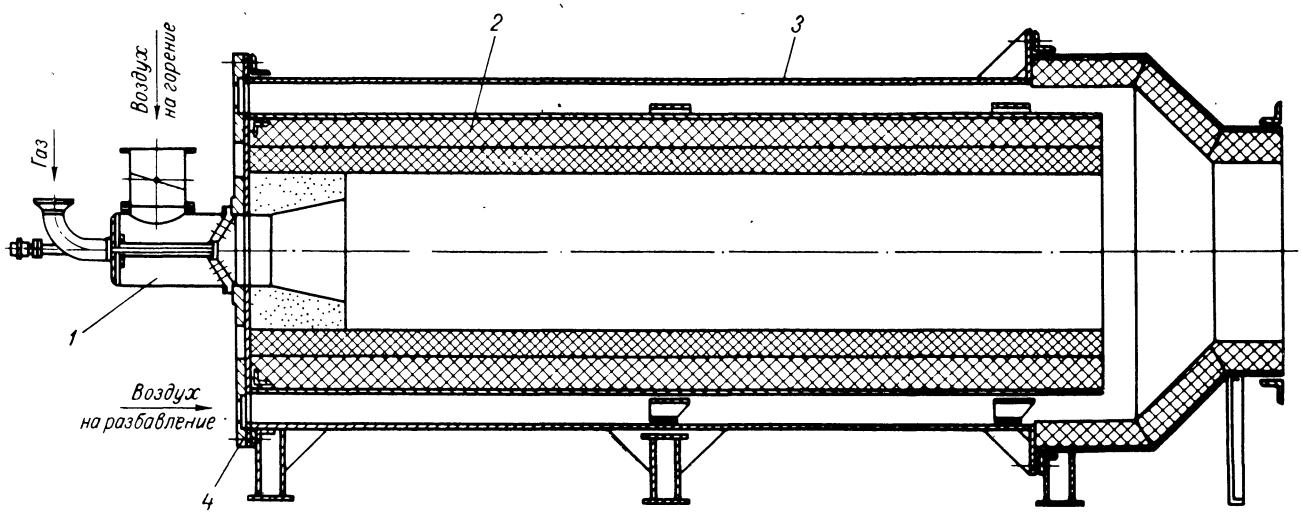


Рис. 109. Топка круглая:

1 — горелка; *2* — футеровка; *3* — кожух; *4* — фронтовая плита.

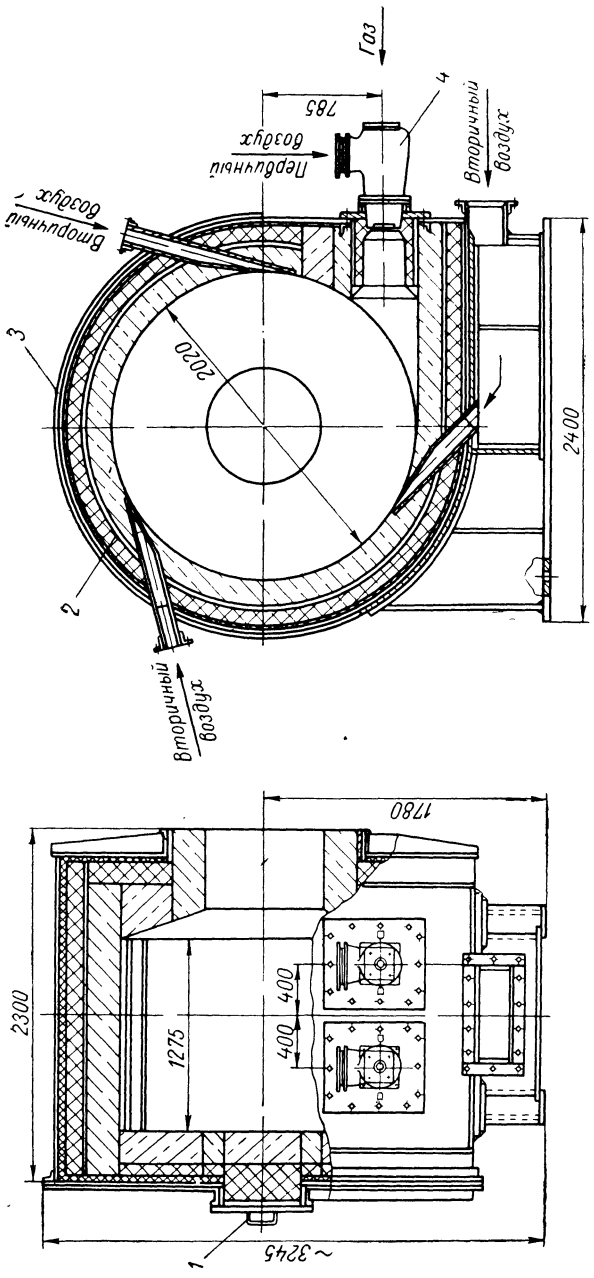


Рис. 110. Топка циклонная:

1 — лаз; *2* — футеровка; *3* — кожух; *4* — горелка.

в металлический кожух. Вторичный воздух подается через три патрубка.

Малая топка имеет аналогичную конструкцию (рис. 111).

На рис. 112 приведена зависимость температуры наружной поверхности кожуха в зависимости от скорости движения вторичного воздуха и толщины футеровки камеры горения газообразного топлива.

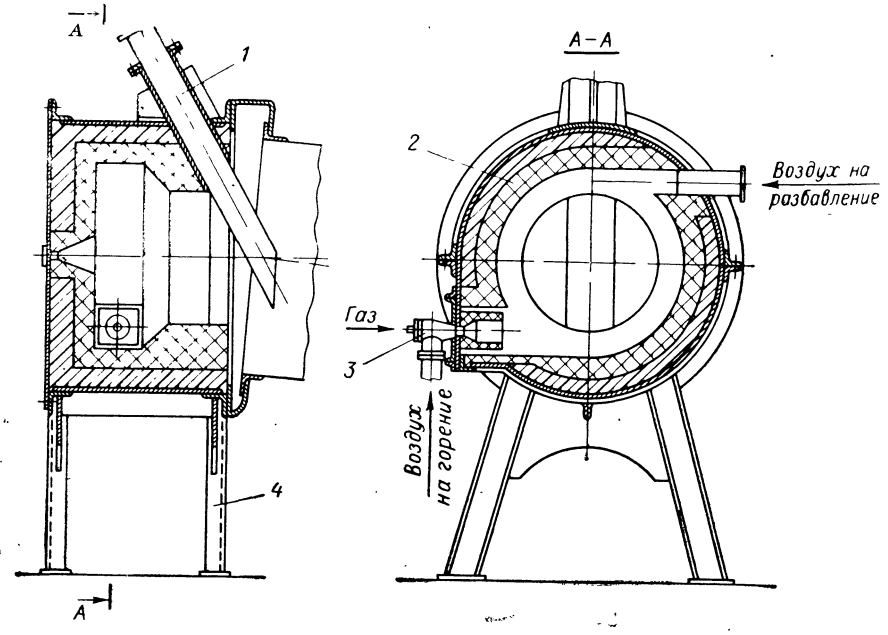


Рис. 111. Топка циклонная:
1 — патрубок для загрузки; *2* — футеровка; *3* — горелка; *4* — каркас.

На рис. 113 приведена конструкция топки, работающей с рециркуляцией дымовых газов. Конструкция топки подобна описанной ранее, и представляет собой вертикальный вариант топки, но разбавление дымовых газов осуществляется за счет циркулирующих дымовых газов, что обеспечивает значительную экономию топлива.

ВЫБОР СЖИГАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Характерной особенностью топок печей КС является их работа при избыточном давлении, соответствующем сопротивлению систем. Эту особенность следует учитывать при выборе сжигающих устройств. Очевидно, что в топках нельзя устанавливать инжекционные горелки. Применяемые горелки и форсунки должны быть длиннофакельные, что позволяет уменьшить толщину кирпичной кладки и исключает перегревание фронтовой плиты и сжигающего устройства. Рекомендуемое число горелок (форсунок) — две — позволяет регулировать количество сжигаемого топлива в широких пределах.

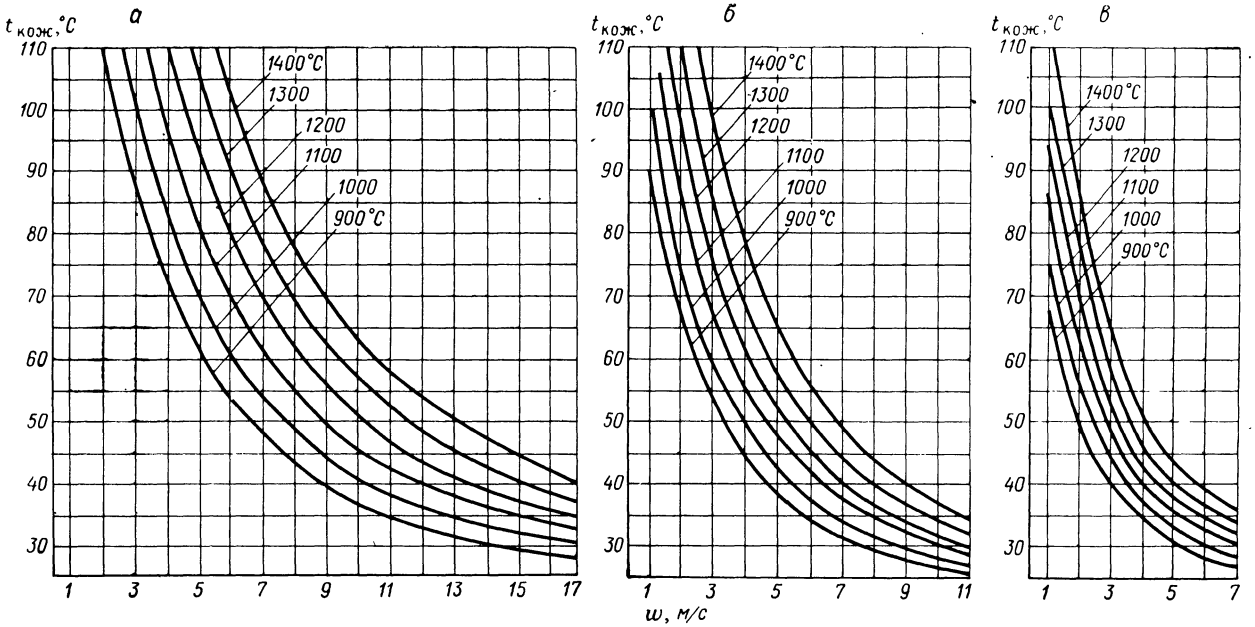


Рис. 112. Зависимость температуры наружной поверхности кожуха от скорости движения воздуха, температуры в топке и толщины футеровки:

а — толщина футеровки 116 мм; *б* — толщина футеровки 232 мм; *в* — толщина футеровки 348 мм.

Большое количество сжигающих устройств затрудняет равномерное распределение подачи топлива и воздуха и усложняет эксплуатацию.

Для понижения температуры в топочном объеме следует через сжигающее устройство подавать максимально возможное (зависит

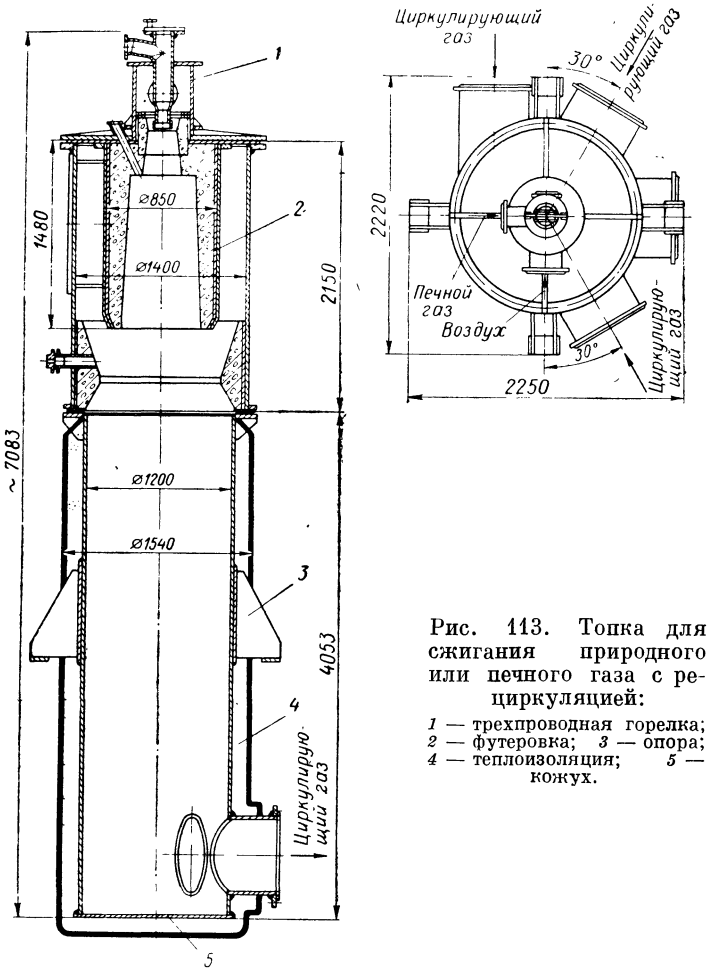


Рис. 113. Топка для сжигания природного или печного газа с рециркуляцией:

1 — трехпроводная горелка; *2* — футеровка; *3* — опора; *4* — теплоизоляция; *5* — кожух.

от конструкции сжигающего устройства) количество воздуха на горение, разумеется, при полной гарантии соблюдения условий безопасной эксплуатации, особенно при сжигании газа.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ТОПОЧНОЙ КАМЕРЫ

При конструировании топок правильное определение объема топочной камеры является важным условием создания компактных, экономичных и высокопроизводительных топочных установок. Объем топочного пространства определяют по опытной величине его теплового напряжения:

$$q = \frac{Q}{V_т} = \frac{BQ_н^р}{V_т}$$

где B — расход топлива, кг/ч (или м³/ч); $Q_н^р$ — низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг, кДж/м³; $V_т$ — объем топочного пространства, м³.

Опытная величина теплового напряжения может колебаться от 350 до 1400 кВт/м³ и зависит от организации горения и температуры в камере горения.

Для получения теплоносителя с температурой 200—700 °С необходимо сжигание топлива проводить при максимально допустимом коэффициенте избытка воздуха (а не при $\alpha = 1{,}05—1{,}2$) с дальнейшим разбавлением дымовых газов воздухом до необходимой температуры. Тепловые напряжения для жидкого топлива принимают до 580 кВт/м³, а для газообразного — до 1400 кВт/м³.

Возможен также метод определения размеров топочного пространства, построенный на базе изучения кинетики реакций и других основных факторов, дающих возможность выявить время горения топлива, т. е. время пребывания в топке частиц топлива, необходимое для завершения процесса до намеченной полноты горения. В этом случае объем топочной камеры выражается следующим уравнением:

$$V_т = V_{д.\,г}\tau$$

где $V_{д.г}$ — объем протекающих в топочном пространстве дымовых газов, м³; τ — время горения топлива, с.

Объем газов равен:

$$V_{д.\,г} = \frac{BV_{д.\,г}}{3600} \cdot \frac{T}{273} \cdot \frac{1{,}054}{P_т \cdot 10^{-5}}$$

где B — расход топлива, кг/ч (или м³/ч); $V_{д.г}$ — объем дымовых газов, образующихся при сгорании 1 кг или 1 м³ топлива, м³/кг или м³/м³; T и $P_т$ — соответственно абсолютные температура и давление в топке, К и Па.

Объем дымовых газов $V_{д.\,г}$ определяют элементарным расчетом. Значительно сложнее найти время горения жидкого топлива. Общее время горения жидкого топлива составляет:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2$$

где τ_1 — время горения газообразных летучих; τ_2 — дополнительное время, необходимое для горения коксового остатка.

Приближенное решение дает (с максимальной погрешностью 3%) упрощенная формула В. А. Ульяницкого, имеющая следующий вид:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \left[2150T^{-1{,}92} \frac{V'_{O_2}}{V_{O_2}} \left(\frac{V_{д.\,г}}{V_{т.\,г}} \right)^2 \frac{1}{q_з} + \right.$$

$$\left. + 2{,}5 \cdot 10^7 T^{-1{,}57} (100 - Л^р - A^р - W^р)\, r^2 p V_{д.\,г} \right] 1/\omega^{2/3}$$

где T — средняя абсолютная температура факела, К; V'_{O_2} — изменение объема кислорода в топочных газах после сгорания топлива, м³/кг; эту величину определяют по уравнению:

$$V'_{O_2} = 0{,}0093\,(C_{лет} - C'' - 2C_{дым})$$

(здесь C'' — неиспользованный углерод вследствие сгорания в окись на 1 кг топлива, масс. %; $C_{дым}$ — углерод, потерянный в виде сажи с уходящими дымовыми газами на 1 кг топлива, масс. %; V_{O_2} — начальный объем кислорода в продуктах сгорания 1 кг топлива, м³/кг; эту величину находят по формуле:

$$0{,}21\alpha V_0 - 0{,}0093 C_{лет} - 0{,}056\,(H^р - 0{,}126O)$$

(здесь α — коэффициент избытка воздуха; V_0 — объем воздуха, теоретически необходимый для сгорания 1 кг топлива, м³/кг); $V_{д.\ г}$ — объем дымовых газов, м³/кг; $V_{т.\ г}$ — объем горючих топочных газов (окиси углерода) до сгорания, м³/кг; эту величину определяют по формуле:

$$V_{т.\ г} = 0{,}0186C$$

$q_з = \dfrac{Q'_з + Q''_з}{Q_{лет}}$ — потери тепла от химического недожога, доля от теплоты сгорания горючих газов (здесь потери тепла от химического недожога, обусловленного сгоранием углерода в окись углерода CO и выпадением несгоревшей сажи (атмосферного углерода) из углеводородов, Дж/кг; $Q_{лет} = 340C_{лет}$ — теплота сгорания горючих топочных газов, Дж/кг; $C_{лет} = Л^р - (H^е + O^р + N^р)$ — содержание углерода в летучей части топлива, %; $Л^р$ — общий выход летучих топлив, %; $A^р$ — содержание воды в топливе, %; $W^р$ — содержание влаги в топливе, %; r — радиус мазута и смолы (r равно в среднем 0,003—0,005 см); ρ — плотность частиц топлива, т/м³ или г/см³ (для мазута 0,9 г/см³); ω — средняя скорость протекания газов в топочном пространстве, м/с.

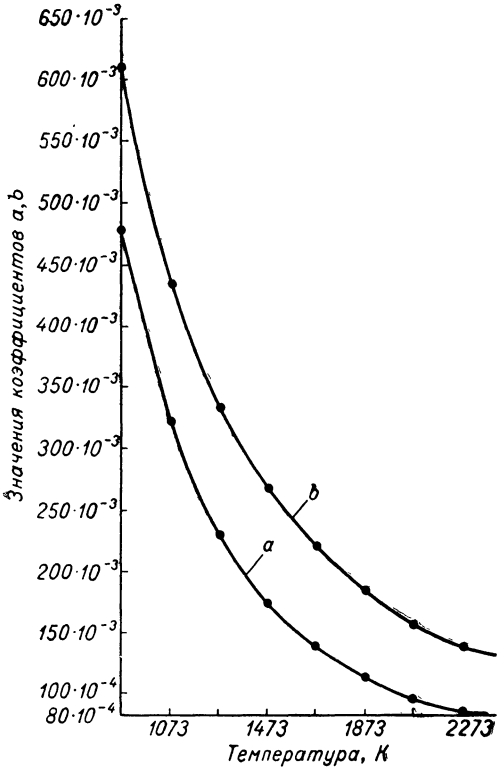


Рис. 114. Зависимость коэффициентов a и b от температуры.

Обозначив:

$$a = 21\,507T^{-1{,}92}$$

$$b = 2{,}5 \cdot 10^7 T^{-1{,}57}$$

$$A = \frac{1}{q_з} \cdot \frac{V'_{O_2}}{V_{O_2}} \left(\frac{V_{д.\ г}}{V_{т.\ г}}\right)^2$$

$$B = (100 - Л^р - A^р - W^р) \times r^2 \rho V_{д.\ г}$$

Получим

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = (aA + bB)^{1/\omega^2/з}$$

Величины a и b находят по графику (рис. 114).

Как указывалось выше, объем топочного пространства равен:

$$V_т = V_{д.\ г}\tau$$

Объем дымовых газов равен:

$$V_{д.\ г} = F\omega$$

Решая эти уравнения, находим:

$$V_т = F\omega\tau$$

Применив полученное раньше выражение для времени горения, получим формулу объема топочной камеры:

$$V_т = F\,(A_1 + B_1)\,\omega^{1/3}$$

где $A_1 = aA$ и $B_1 = вB$.

Объем топки можно легко определить из рис. 115.

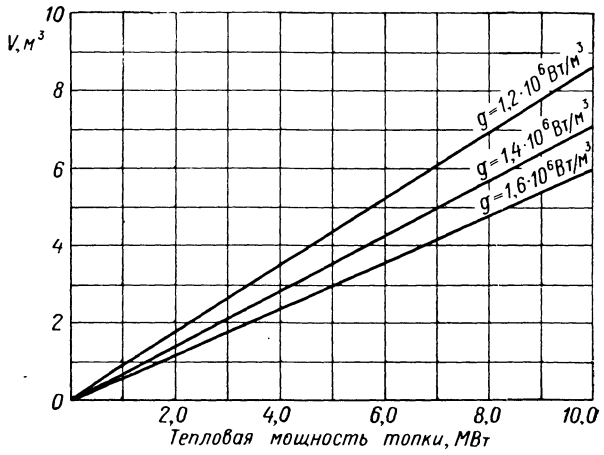


Рис. 115. График для определения объема топки в зависимости от тепловой мощности и допустимого теплового напряжения.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ КАМЕРЫ ГОРЕНИЯ ТОПКИ

При определении длины камеры горения топки необходимо учитывать длину горящего факела и к установке принимать газогорелочные устройства, обеспечивающие длиннофакельное горение газа. Это необходимо для предотвращения преждевременного выхода из строя фронтальной огнеупорной футеровки камеры горения из-за перегрева.

Длину горящего факела можно определить из следующего уравнения

$$L_ф = 5{,}3 d_0 \sqrt{\frac{T_ф\,(1+V_0)}{T_г \sigma}\left(1+\frac{\gamma_в}{\gamma_г}V_0\right)}$$

где $L_ф$ — длина видимого факела, м; d_0 — диаметр выходного сечения сопла, м; $T_ф$ — адиабатическая температура горения газа, К; $T_г$ — температура истекающего газа, К; σ — отношение числа молей реагирующих веществ к числу молей продуктов реакции для стехиометрической смеси; V_0 — количество воздуха, теоретически необходимого для горения 1 м³ газа; $\gamma_в$ — предельная масса воздуха, кг/м³; $\gamma_г$ — удельная масса газа, кг/м³.

Длину горячего факела можно также принять из табл. 36.

Таблица 36

Длина горящего факела при сжигании природного газа

Показатели	Диаметр сопла, мм				
	1,5	2,4	3,5	4,0	5,0
Давление газа перед соплом, Па	100—200	100—300	100—500	200—700	200—800
Действительная длина факела, мм	240—260	360—400	560—610	650—700	760—800
Максимальный диаметр факела, мм	31—32	42—50	67—70	81—84	90—105

Глава IV

ЭЛЕМЕНТЫ ПЕЧЕЙ И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ПЕЧЕЙ И БОРОВОВ

Качество, долговечность и экономичность печи зависят в значительной степени от того насколько правильно были выбраны материалы для отдельных ее частей: а) футеровки печи и борова; б) фундаментов; в) каркасов, кожухов рабочих окон, леток и т. д.

Футеровка печей

Особенности футеровки печей химических производств. Футеровка печи отделяет реакционное пространство и соединительные каналы от окружающей атмосферы. Внутренняя поверхность футеровки участвует в теплообменных процессах, совершающихся в печи. Через внешнюю поверхность футеровки происходит теплообмен с окружающей средой. Таким образом, она участвует в двух взаимносвязанных системах теплообмена: внутренней и внешней. Для того чтобы свести к минимуму это взаимное влияние, футеровку выполняют из материала, обеспечивающего ее надлежащее тепловое сопротивление.

При проектировании футеровки необходимо учитывать, что во время работы печи, начиная с некоторых температур, происходит огневая усадка огнеупоров (шамот) или их дополнительный рост (динас). При комбинированной кладке необходимо проверить правильность выбранной конструкции определением температуры на каждом слое футеровки; это особенно важно для печей химических производств.

Технологические функции футеровки в печах химических производств особенно важны, так как в большинстве случаев, печь представляет собой высокотемпературный реактор, где проводятся различные химико-технологические процессы при высоких давлениях, на которые оказывает химическое воздействие материал футеровки. Химические реакции, протекающие в печах при высокой температуре и давлении, являются основными чертами, по которым печи химической промышленности отличаются от других печей.

Поэтому правильный выбор материала футеровки весьма важен, так как определяет бесперебойную и длительную работу.

Присутствие жидкой фазы в печах (руднотермических, карбидных, тамбурных и др.) увеличивает участие футеровки в технологическом процессе, так как жидкая фаза тесно контактирует

с футеровкой. Чем агрессивнее свойства жидкой фазы, тем большее участие футеровки в технологическом процессе.

Газовая фаза также может взаимодействовать с футеровкой (печи для сжигания серы, колчедана и др.), ускоряя ее разрушение. Поэтому особенности технологического процесса влияют на выбор материала футеровки.

Футеровка должна быть прочной (сопротивление деформации): при рабочих температурах под действием постоянных и переменных тепловых нагрузок (термическая устойчивость), при протекании процессов в агрессивной среде (химическая стойкость) и при механических воздействиях материалов, проходящих через печь (механическая стойкость).

Правильно запроектированная футеровка печи — гарантия ее надежности, долговечности и эксплуатации. Итак, что такое футеровка. Это конструкция из огнеупорных, теплоизоляционных и кислотоупорных *материалов*, защищающих реакционное пространство печи от воздействия окружающей атмосферы, а порядок укладки штучных футеровочных материалов называется кладкой.

Материалы для наружной футеровки. В целях экономии и рационального использования огнеупорных материалов, уменьшения теплопотерь в окружающую атмосферу, наружная поверхность большинства печей и топок футеруется из красного строительного или диатомового кирпича.

Огнеупорные материалы. Из огнеупорных материалов строят рабочие камеры (реакционные полости), топки и футеруют стенки теплоиспользующих устройств, дымоходы, борова и трубы.

В зависимости от температуры плавления огнеупорные материалы делят на три группы: огнеупорные с температурой плавления 1580—1770 °С, высокоогнеупорные с температурой плавления 1770—2000 °С и с высшей огнеупорностью с температурой плавления >2000 °С.

Качество огнеупоров характеризуется огнеупорностью, температурой начала деформации под нагрузкой, изменением объема при нагревании, термической стойкостью, механической прочностью, устойчивостью против воздействия шлаков и окислов, правильностью заданной геометрической формы и точностью размеров. Основные виды огнеупоров, применяемых в печах, и их свойства приведены в табл. 37.

Основным огнеупорным материалом, наиболее часто применяемым в строительстве печей, является шамот. Допустимые температуры (в °С) для шамотной кладки:

Для кирпича класса А	1300—1400
» » » Б	1250—1300
» » » В	1200—1250

Кислотоупорные материалы. Внутренняя кладка печей-реакторов должна противостоять воздействию агрессивной среды. Ее футеруют неметаллическими кислотоупорными материалами. Эти материалы можно разделить на три основных вида:

1) природные кислотоупорные материалы — андезит, бештаунит, гранит, диабазы, базальты, фельзит, кристаллический кремнезем, кварц, кварциты, кварцевый песок, маршалит и др.;

2) искусственные кислотоупорные силикатные материалы — кислотоупорные керамические изделия (кирпич, плитка, блоки и т. д.), изделия из плавленых горных пород (диабазовые и базальтовые плитки) бетон на основе жидкого стекла и т. д.;

3) органические кислотоупорные материалы — битумы и композиции из них, замазки (типа арзамит), графитированные и угольные материалы, резина, полиизобутилен и др.

Физико-механические свойства искусственных кислотостойких силикатных материалов приведены в табл. 38.

Химическая стойкость материалов, применяемых для защиты от коррозии, приведены в табл. 39.

Теплоизоляционные материалы. Для уменьшения потери тепла через стены и своды печей огнеупорную кладку защищают материалами, плохо проводящими тепло. Такие материалы называются теплоизоляционными, а сама футеровка тепловой изоляцией.

К теплоизоляционным материалам относятся легковесные огнеупоры, диатомовый кирпич, минеральная вата, асбест, котельный или доменный гранулированный шлак и др. Чаще для тепловой изоляции печей применяют диатомовый кирпич. Его изготовляют из смеси трепела или диатомита с древесными опилками. При обжиге опилки выгорают, кирпич получается пористым, следовательно, менее теплопроводным. Диатомовые изделия могут применяться в местах с температурой не выше 900 °С. В местах, где температура не превышает 600 °С, применяют минеральную вату. В качестве прокладки между металлическим кожухом и огнеупорной кладкой для уменьшения газопроницаемости и как теплоизоляционный материал применяют минеральную вату. В качестве засыпной изоляции для сводов и стен печей используют также диатомовый и трепельный порошок, асбозурит (смесь молотого диатомита с асбестом), просеянный котельный шлак, а также гранулированный доменный шлак. Основные свойства теплоизоляционных материалов и их применение приведены в табл. 40.

Вяжущие материалы, растворы, огнеупорные бетоны, обмазки. Вяжущие материалы служат для получения растворов, огнеупорных бетонов и обмазок, применяемых при постройке печей в химической промышленности. К вяжущим материалам относятся: цементы, известь, глина.

Огнеупорные растворы (мертели) являются полужидкими массами; их применяют при строительстве и ремонте печей для заполнения швов, неплотностей, для придания кладке прочности и газонепроницаемости. Огнеупорные растворы должны удовлетворять следующим требованиям:

а) при затворении водой приобретать необходимую консистенцию и легко заполнять неровности кладки, не растрескиваться и медленно отдавать влагу;

Огнеупоры	Химический состав огнеупорной основы, %	Огнеупорность по стандартному образцу, °С (не менее)	Температура начала деформации под нагрузкой 0,2 МПа, °С	Максимальная допустимая рабочая температура, °С	Термическая стойкость в водяных теплосменах	Временное сопротивление сжатию, МПа
Высокоглиноземистые (муллитовые корундовые и др.)	O_2 . . . . . 0—45 Al_2O_3 . . . . . 100—50	1750—2050	1450—1870	1400—1850	20—50	20—60
Графитовые	SiO_2 . . . . . 33—46 Al_2O_3 . . . . . 30—12 C . . . . . 20—50	Более 2000	1400—1600	—	—	13—30
Динасовые (ГОСТ 4157—69)	SiO_2 . . . . . 93—97	1690—1729	1620—1660	1630—1680	1—4	15—20
Карборундовые	SiC . . . . . 50—95	1820—2000	1700—1850	1600—1750	50—60	40
Магнезитовые	MgO . . . . . 91—96	1900—2000	1500—1550	1750—1800	1—2	30—65
Магнезитохромитовые (хромомагнезитовые)	MgO . . . . . 66—35 Cr_2O_3 . . . . . 8—18	1800—1900	1500—1550	1650—1700	5—50	20—50
Полукислые (кварцеглинистые ГОСТ 4873—71)	SiO_2 . . . . . 70—80 Al_2O_3 . . . . . 26—15	1600—1700	1300—1400	1250—1350	4—15	10—12,5
Углеродистые (коксовые)	C . . . . . 85—92	Более 2500	1700	—	—	12—30
Форстеритовые	SiO_2 . . . . . 33—40 MgO . . . . . 60—40	1750—1850	1550—1700	1500—1650	5—10	17,5—40
Циркониевые	ZrO_2 . . . . . 70—90	Более 2000	Более 1700	1800—1950	—	140
Шамотные	SiO_2 . . . . . 50—65 Al_2O_3 . . . . . 45—30	1610—1730	1250—1400	1200—1400	10—50	10—15

Таблица 37

Характеристика огнеупорных материалов

Плотность, кг/м³	Насыпная плотность, кг/м³	Коэффициент теплопроводности (λ), Вт/(м·°С)	Средняя теплоемкость, (c) при 100 °С кДж/(кг·°С)	Пористость, %	Химические свойства при высоких температурах
—	3000—4000	1,63—3,26	—	До 25	Хорошая сопротивляемость основным и кислым шлакам. Удовлетворительная — восстановительным и окислительным реагентам
—	1800	При 300 °С 3,4—4,65	—	23—28	Удовлетворительная сопротивляемость основным и кислым шлакам и восстановительным реагентам. Плохая сопротивляемость окислительным реагентам
2330—2430	1700—2000	$1{,}047+0{,}93\frac{t}{1000}$	0,770	18—24	Плохая сопротивляемость основным шлакам и восстановительным реагентам. Хорошая сопротивляемость кислым шлакам и окислительным реагентам
2800—3100	2300	При 300 °С 4,65—5,8	—	20—26	Плохая сопротивляемость основным и кислым шлакам. Хорошая — по отношению к восстановительным реагентам и удовлетворительная — к окислительным реагентам
3500—3600	2400—2700	$4{,}30-0{,}51\frac{t}{1000}$	0,913	25—28	Хорошая сопротивляемость основным шлакам и окислительным реагентам. Удовлетворительная — по отношению к восстановительным реагентам. Плохая сопротивляемость кислым шлакам
3500—4000	2600—3200	$1{,}97-0{,}215\frac{t}{1000}$	—	16—28	Хорошая сопротивляемость основным шлакам и окислительным реагентам. Удовлетворительная — по отношению к кислым шлакам и плохая сопротивляемость восстановительным реагентам
—	1800—1950	—	—	20—30	Удовлетворительная сопротивляемость кислым и основным шлакам
1800—2200	1400—1600	При 300 °С 5,80—17,5	1,256	30—35	Удовлетворительная сопротивляемость основным и кислым шлакам и восстановительным реагентам. Плохая сопротивляемость окислительным реагентам
—	2000—3000	—	—	5—40	Удовлетворительная и хорошая сопротивляемость основным и кислым шлакам
—	3700	При 300 °С 2,9	—	—	Хорошая сопротивляемость окислительным реагентам. Удовлетворительная — по отношению к основным и кислым шлакам. Плохая — к восстановительным реагентам
2500—2700	1700—2300	$0{,}698+0{,}64\frac{t}{1000}$	0,842	13—30	Плохая сопротивляемость основным шлакам и удовлетворительная — кислым шлакам, а также кислым и основным реагентам

Материал	ГОСТ, ОСТ, ТУ	Объемная масса, кг/м³	Водопоглощение, %	Теплопроводность, Вт/(м·°С)	Температура, °С	Пористость, %	Коэффициент линейного расширения, $\alpha \cdot 10^6$
Андезитовая замазка	—	—	—	—	—	—	18,8
Глетоглицериновый цемент	—	—	—	—	До 300	3—7	12,6
Графитированный	—	1380—1800	—	122,11—145,37	—	—	4,5
Графитированный пропитанный	—	1800—1860	—	130,26	170	—	8,5
Диабазовая замазка	—	1950—2000	—	0,58	—	5—14	—
Жароупорный бетон	—	1800—1900	—	0,7	900	—	7.5
Кварцевое стекло	—	2100	—	1,05—1,16	~1200	3—4	0,4—0,55
Кислотоупорный бетон	—	2300—2350	—	0,81—1,16	—	Значительная	8,0
Кирпич клинкерный	ОСТ 4245	1900	I сорт — 2 II » — 4 III » — 6	1,39	—	—	—
Кислотоупорный кирпич	ГОСТ 474—67	2100—2300	I сорт ⩽ 8 II » ⩽ 10 III » ⩽ 11	1,05—1,22	—	0,3—10 (по водопоглощению)	4,3—4,9

Таблица 38

-химические свойства искусственных кислотостойких силикатных материалов

Теплоемкость, $\frac{кДж}{кг \cdot °C}$	Предел прочности при растяжении, Па	Предел прочности при сжатии, Па	Предел прочности при изгибе, Па	Адгезия, Па	Примечание
—	$24{,}5 \cdot 10^5$— $34{,}3 \cdot 10^5$	$176{,}5 \cdot 10^5$— $245{,}2 \cdot 10^5$	—	$19{,}6 \cdot 10^5$— $24{,}5 \cdot 10^3$ (сталь и керамика) $17{,}6 \cdot 10^5$— 21,6 (стекло и свинец)	—
—	$28{,}4 \cdot 10^5$— $48{,}0 \cdot 10^5$	—	—	—	—
0,691 (при 26—76 °С)	$65{,}7 \cdot 10^5$— $68{,}6 \cdot 10^5$	$236{,}3 \cdot 10^5$— $255{,}0 \cdot 10^5$	$103{,}0 \cdot 10^5$— $123{,}6 \cdot 10^5$	—	—
1,641 (при 56—1450 °С)	$118{,}7 \cdot 10^5$— $174{,}5 \cdot 10^5$	$330{,}5 \cdot 10^5$	—	—	Выпускается в виде плиток АТМВТУ М367—53. Размеры плиток: 180×120×15; 180×100×10 мм
—	$29{,}4 \cdot 10^5$— $68{,}6 \cdot 10^5$	$490{,}3 \cdot 10^5$	—	$19{,}6 \cdot 10^5$— $24{,}5 \cdot 10^5$ (сталь и керамика) $17{,}6 \cdot 10^5$— $21{,}6 \cdot 10^5$ (стекло и свинец)	—
—	—	$147{,}1 \cdot 10^5$— $196{,}1 \cdot 10^5$	—	—	Линейная усадка 0,4—1,0%
0,754—1,038	$441{,}3 \cdot 10^5$	$3365{,}8 \cdot 10^5$	$392{,}3 \cdot 10^5$	—	Температура размягчения ~1500 °С, твердость по Моосу 7
—	$10{,}8 \cdot 10^5$— $11{,}8 \cdot 10^5$	$107{,}9 \cdot 10^5$— $117{,}7 \cdot 10^5$	—	—	—
—	—	I сорт $911{,}6 \cdot 10^5$ II сорт $686{,}5 \cdot 10^5$ III сорт $392{,}3 \cdot 10^5$, не менее	—	—	Размеры кирпича: 220×110×65; 220×110×75 мм
0,774—0,783	$49{,}0 \cdot 10^5$— $98{,}1 \cdot 10^5$	I сорт $\geqslant$ $\geqslant 245{,}2 \cdot 10^5$ II сорт $\geqslant$ $\geqslant 196{,}1 \cdot 10^5$ III сорт $\geqslant$ $\geqslant 147{,}1 \cdot 10^5$	$98{,}0 \cdot 10^5$— $392{,}3 \cdot 10^5$	—	Выпускается стандартный прямой кирпич размером 230×113×65 мм и клиновой с клином ребровым и торцевым 55/65 мм

Материал	ГОСТ, ОСТ, ТУ	Объемная масса, кг/м³	Водопоглощение, %	Теплопроводность, Вт/(м·°С)	Температура, °С	Пористость, %	Коэффициент линейного расширения, $\alpha \cdot 10^6$
Кирпич шамотный	ГОСТ 390—69	~1900	—	0,84	См. примечание	20—30	—
Плитка диабазовая	—	2900—2950	0,0	0.99	~160	—	6—10
Плитка керамическая для полов (метлахская)	ГОСТ 6787—69	2100—2300	2—4	1,05—1,22	—	—	4,3—4,9
Плитка керамическая к/у (т/у)	ГОСТ 961—68	2100—2300	6—9	1.05—1,22	—	—	4,3—4,9
Серный цемент	—	—	—	—	95	0,52	15

б) иметь аналогичные с огнеупорами кладки, химический состав и огневые свойства;

в) обладать небольшой газопроницаемостью и пористостью в шве после воздействия рабочих температур.

Кладку шамотных огнеупоров ведут на смесях, содержащих молотые материалы, огнеупорную глину и шамот.

Растворы для динаса изготовляют из смеси молотого кварцита (60—80%), динасового боя (25—30%) и огнеупорной глины (10—15%).

Продолжение табл. 38

Теплоемкость, кДж/(кг×°С)	Предел прочности при растяжении, Па	Предел прочности при сжатии, Па	Предел прочности при изгибе, Па	Адгезия, Па	Примечание
0,837—1,13	—	Не менее $78{,}4 \cdot 10^5$—$122{,}6 \cdot 10^5$	—	—	Выпускается трех классов: А, Б, В. Огнеупорность: класса А — 1730 °С; класса Б — 1670 °С; класса В — 1580 °С. Размеры кирпича: 230×113×65 и 250×123×65; клин 55/65 мм
1,038	$196{,}1 \cdot 10^5$	$1923{,}1 \cdot 10^5$—$3846{,}3 \cdot 10^5$	$294{,}2 \cdot 10^5$—$392{,}3 \cdot 10^5$	—	Размеры плитки 180×115×18 мм
0,774—0,783	$88{,}3 \cdot 10^5$—$98{,}1 \cdot 10^5$	—	$147{,}1 \cdot 10^5$—$294{,}2 \cdot 10^5$	—	Основные размеры плиток: 50×50×10; 100×100×10; 150×150×13; 100×50×10; 150×75×13 мм
0,774—0,783	$49{,}0 \cdot 10^5$—$98{,}1 \cdot 10^5$	$\geqslant 294{,}2 \cdot 10$	$\geqslant 147{,}1 \cdot 10^5$	—	Основные размеры плиток (в мм): 50×50×10; 100×100×10; 100×100×10; 100×100×20; 150×150×δ (δ = 20; 25; 30); 175×175×δ (δ = = 20; 30; 35; 50); 200×200×δ (δ = 20; 30; 35; 50)
—	$34{,}3 \cdot 10^5$—$53{,}9 \cdot 10^5$	$580{,}5 \cdot 10^5$	—	$3{,}9 \cdot 10^5$ (сталь) $6{,}9 \cdot 10^5$ (бетон) $13{,}0 \cdot 10^5$ (дерево) $12{,}7 \cdot 10^5$ (керамика) $4{,}9 \cdot 10^5$—$6{,}4 \cdot 10^5$ (резина)	—

При магнезитовой кладке раствор готовят из магнезитового порошка и каменноугольной смолы.

Огнеупорные бетоны применяют при сооружении низко- и среднетемпературных печей, работающих при 600—1000 °С (например, подины механических полочных печей, печи для обжига пылевидного колчедана, решетки у печей КС и др.). Получают их из высокоглиноземистого цемента, глиноземистого гидравлически твердеющего цемента, портландцемента с тонкомолотыми добавками глины, шамота, кварца и жидкого стекла с добавками кремнефторида

Материал	азотная		серная		сернистая	
	концентрация, %	температура, °С	концентрация, %	температура, °С	концентрация, %	температура, °С
Андезит	Любая	Кипения	96	До 230	Разбавленный раствор	—
Арзамит 1	Нестоек		70	20	Стоек	
Асбест амбриболовый	65	Кипения	95	100	—	—
Асбовинил	До 10—15	20 (относительно стоек)	До 65 (слабая)	20 100	—	—
Битуминоль	До 30	То же	До 50	60 (относительно стоек)	Любая (относительно стоек)	До 80 (относительно стоек)
Винипласт	До 40—50	До 40 (относительно стоек)	До 40 96	40 20	Стоек	
Диабазовые плитки	Стойки		96	Кипения	Разбавленный раствор	130
Кислотоупорный бетон	Любая	Кипения	Стоек		Стоек	
Кислотоупорная силикатная замазка	»	»	Стойка		Стойка	
Кислотоупорные плитки и кирпич	»	»	96	Кипения	Любая	Кипения
Мягкая резина	До 2	25	До 50	65	»	65
Пропитанный графит и уголь	До 10	85	До 96	80	»	Кипения
Полиизобутилен ПСГ	До 50	50	До 80	60	—	—
Серный цемент	До 40 До 30	20 90	50	90	Стоек	
Фаолит	10	20 (относительно стоек)	70 70—90	70 25	Любая	Кипения
Эбонит	До 8—20	25	До 50	До 65	»	65

Таблица 39

Химическая стойкость материалов, применяемых для защиты от коррозии

Кислота							
соляная		уксусная		фосфорная		плавиковая	
концентрация, %	температура, °С	концентрация, %	температура, °С	концентрация, %	температура, °С	концентрация, %	температура, °С
Любая	100	—	—	—	—	Нестоек	
Любая	—	Стоек		—	—	»	
30 (относительно стоек)	Кипения	—	—	Разбавленный раствор	30 (относительно стоек)	—	—
30 (слабая)	75 100	Ледяная	20	—	—	—	—
Разбавленный раствор		Слабая	80 (относительно стоек)	До 30	20 (относительно стоек)	До 50	80 (относительно стоек)
До 30	40	До 60 Ледяная	40 (относительно стоек)	>30	60	До 40 40	20 (относительно стоек)
Любая	100	—	140—150	—	Кипения	Нестойки	
Стоек		Стоек		Стоек		Нестоек	
Любая	Кипения	Любая	До кипения	85	Кипения	Нестойка	
»	»	»	»	—	—	Нестойки	
» »	65 Кипения	До 80 Любая	65 Кипения	До 85 До 85	50 Кипения	До 50 До 48 До 60 До 80	65 Кипения До 85 20
30	80	80 Ледяная	40	80	100	60 40	20 60
—	90	—	До 90	85	До 90	Стоек (наполнитель графит)	
Любая	До 100	50	100	50 До 80	100 До 50	Нестоек	
»	65	Любая	65	Любая	50	Концентрированная	65

Таблица 40

Основные свойства теплоизоляционных материалов и изделий

	Объемная масса, кг/м³		Коэффициент теплопроводности λ, Вт/(м·°С)	Максимальная температура применения, °С	Применение
	в порошке	в изделиях			
Материал					
Асбестовая мелочь шестого сорта	650—850	—	$0{,}0233+0{,}000186t$	500	Для изоляции горячих поверхностей (чаще трубопроводов) мастичными материалами
Асбозурит	450	—	$0{,}16224+0{,}0001686t$	300	То же
Диатомит в порошке	300—500	—	$0{,}0907+0{,}00028t$	800—900	В качестве засыпной изоляции в печах различного типа
Зонолит (вермикулит)	0,150—0,250	—	$0{,}0721+0{,}000262t$	900—1000	То же
Минеральная вата	180—250	—	0,0465—0,058 при 50 °С	500	В качестве засыпной изоляции для низкотемпературных печей
Совелит	230—250	—	$0{,}0901+0{,}0000872t$	500	То же
Трепел в порошке	500	—	0,1046 при 50 °С	900	В качестве засыпной изоляции в печах различного типа
Шлаковая вата	200—250	—	$0{,}058+0{,}000162$	750	В качестве засыпной изоляции для низкотемпературных печей
Изделие					
Асбестоцементные плиты	—	400	0,0988 при 100 °С	—	Для изоляции стен и сводов печей
Вермикулитовые плиты	—	300—380	$0{,}0198+0{,}000151t$	660—750	То же
Вулканитовые плиты	—	400	$0{,}0802+0{,}000209t$	700—750	»
Диатомовый кирпич (ГОСТ 2694—67)	—	5,50—750	$0{,}1128+0{,}00023t$	800—900	Для кладки наружного изоляционного слоя стен и сводов печей
Кирпич легковесный шамотный (ГОСТ 5040—68)	—	900—1300	0,605 при 100 °С 0,756 при 1200 °С	1000—1200	Для кладки стен и сводов печей с рабочей температурой до 1100 °С и для изоляции стен и сводов высокотемпературных печей
Кирпич пеношамотный	—	600—800	0,128—0,186 при 100 °С	1000—1100	Для изоляции стен и сводов высокотемпературных печей и для кладки стен низкотемпературных печей
Совелитовые плиты	—	400—450	$0{,}079+0{,}000186t$	450—500	Для изоляции стен и сводов низкотемпературных печей

натрия. В качестве заполнителей при изготовлении огнеупорных бетонов служат различные измельченные огнеупоры. Для бетонов, работающих при 900—1300 °С, применяют шамот и полукислые огнеупоры, а для бетонов, выдерживающих 1300—1500 °С, хромит или хромомагнезит.

Шамотные бетоны содержат 15—20% глиноземистого цемента и 80—85% шамотного порошка определенных фракций:

Зерно крупностью до 1 мм	60%
10—20 »	25%
40—60 »	15%

Хромитовые глиноземистые бетоны приготовляют из глиноземистого цемента (7—15%) и хромитового измельченного порошка (93—85%). Фракции хромита:

Зерно крупностью до 0,5 мм	35—45%
» » 0,5—5 »	65—55%

Огнеупорные обмазки используют для защиты поверхности огнеупорных футеровок от токсического действия печной среды, а также для снижения газопроницаемости футеровки. Нанесение на футеровку обмазок из обычных огнеупоров, содержащих цирконит, повышает срок службы огнеупоров.

Свойства футеровочных материалов. Возведение кладки печи требует знания свойств футеровочных материалов. Стенка печи выкладывается таким образом, чтобы температурный перепад в отдельных слоях футеровки соответствовал термическим пределам применения различных огнеупорных материалов.

Для расчета термической стойкости материалов следует учитывать их постоянство объема при продолжительной эксплуатации с механическими и химическими нагрузками, возникающими в футеровке печи. Сопротивление алюмосиликатных огнеупоров действию механических нагрузок при высоких температурах может при длительной эксплуатации значительно уменьшиться вследствие образования стекла. В присутствии углерода и водяных паров с температурой 1200 °С могут происходить кристаллические превращения кремниевой кислоты в материале с одновременным изменением его объема. Все это может привести к значительным повреждениям кирпичной футеровки. Опыт показывает, что большей частью переоценивают термическую стойкость строительных материалов, используемых для подвергаемой высоким нагрузкам внутренней кирпичной футеровки печей. Это, в частности, относится к таким бесформенным изоляционным материалам как волокнистые и наполнительные, которые могут выдерживать только ограниченные термические нагрузки, являясь слабостойкими против водяных паров и кислых конденсатов, и вследствие изменения их структуры не сохраняют постоянство объема.

Для кирпичной футеровки следует также выбирать и соответствующий связующий материал. Так, стройматериалы с содержанием извести и цемента являются малостойкими по отношению к

кислотосодержащим средам, керамические строительные растворы становятся твердыми только при длительном их нагревании, приблизительно до температур красного каления, а при более низких температурах они только высыхают с уменьшением объема вследствие выделения воды, достигая при этом только умеренной прочности.

Стройматериалы с содержанием жидкого стекла, шпаклевки и набивочные массы затвердевают уже в холодном состоянии и являются кислотостойкими примерно до 1000 °С. Находят также применение и холоднотвердеющие шпаклевочные материалы с другими связующими (табл. 41).

Таблица 41

Основные огнеупорные футеровочные материалы

Футеровка	Основа	Материал
Кислая	Алюмосиликаты	Каменно-керамические материалы, шамоты, материалы с высоким содержанием глины, силлиманит, муллит, корунд
Основная	Магнезит, хромит, доломит	Магнезит, спинаель, орстерит, хромомагнезит, хромокорунд, магнезит (доломит, хромо-доломит)
Нейтральная	Углерод и карбиды	Углерод, графит, карбид кремния
	Цирконий	Окись циркония (силикат циркония)

Во всяком случае, имеется очень небольшое количество основных материалов, комбинация и обработка которых в процессе их изготовления дает много модификаций. Указания по стойкости огнеупорных материалов с односторонней нагрузкой по отношению к химическим воздействиям приведены в табл. 42.

При производстве стройматериалов изделия формируются вручную или предварительно обрабатываются и затем производится дополнительная прессовка их, кирпичи с более специальной структурой зерна встряхиваются, штампуются или гидравлически прессуются. Есть сырьевые материалы, разливаемые в жидком состоянии или получаемые из расплава.

Способ изготовления влияет на свойства продукции и на точность формы изделий, потому что в зависимости от удаляемого в процессе обжига из полуфабрикатов количество летучих веществ и в зависимости от температуры обжига может иметь место усадка различной степени.

С помощью добавки в сырье средств, разрушающихся или выделяющихся во время процесса обжига, можно получать пористые легковесные кирпичи, применяемые в качестве теплоизоляционных материалов. С другой стороны, содержащиеся в самом сырье или добавляемые в печи флюсы, которые плавятся при умеренной температуре или в сочетании с другими материалами образуют эвтектику с пониженной температурой плавления, оказывают в процессе обжига воздействие на уплотнение структуры кирпичей. Таким путем

Таблица 42

Стойкость огнеупорных материалов с односторонней нагрузкой по отношению к химическим воздействиям примерно при 1000 °С

Среда	SiO_2 (плавленый кварц)	Динас	Силикат циркония	Карбид кальция (бедный железом)	Плотные алюмосиликаты ($SiO_2 > 20\%$ Al_2O_3)	Шамот (>30% Al_2O_3)	Шамот (>40% Al_2O_3)	Кирпич (>50% Al_2O_3)	Силлиментный (~70% Al_2O_3)	Корундовый (>95% Al_2O_3)	Углерод	Магнезит	Хромомагнезит	Доломит	Форстерит
	Максимальная температура использования материала, в °С														
	1200	1600	1550	1600	1300	1350	1400	1450	1600	1700	2000	1650	1550	1600	1250
Газы окисляющие:															
кислород O_2	+	+	+	—	+	+	+	+	+	+	—	+	+	+	+
олеум SO_3	+	1	1	—	1	0	0	0	1	1	—	>1100 °С		>1100 °С	—
двуокись серы SO_2	+	+	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	+	1	—
Газы восстанавливающие:															
водород H_2	<1200°С	+	1		1	1	1	1	+	1	+	+		<1200 °С	—
сероводород H_2S	1		1		1									1	
синильная кислота HCN	1		0		—	—	—	—	—	—	1	—			
плавиковая кислота HF	—	—	0		—	—	—	—	—	0	+	—		—	—
окись углерода CO	+	1	1		0	0	0	0	1	1	+	+	0	0	—
хлор Cl_2	+	1	+		—	—	—	—	—	—	0	—	—	0	0
фосген $COCl_2$	+	1	1			—	—	—	—	—	—		—	—	—
Кислоты (пары):															
азотная HNO_3	+	1	1		1				1	1	—	—	—		—
фосфорная H_3PO_4	+	1	1		1						—	—	—		—
серная H_2SO_4	+	1	1		1	1	1	1	1	1	+	—	—		—
соляная HCl	+	1	1		1	0	0	0	1	+	+	—	—		—
Соли *:															
сульфат железа $FeSO_4$	—	—	1		0	—	—	0	0	0	—	1	1		1
сульфат ванадия $V_2(SO_4)_3$			1		—	—	—	0	0	1	—	1	1		
хлорид аммония NH_4Cl				1	1	—	—	—			1	0			
бисульфат натрия $NaHSO_4$	1	1	1	0	1			0	0	1	—	0			
бисульфат аммония NH_4HSO_4	+	1	1	1	1			0	1	+	—	0			
сульфат натрия Na_2SO_4	+	1	1	0	0	1	1	1	1	+	—	1	0	0	0
хлорид натрия NaCl	0	—	0	0	1	—	—	—		1	1	+	—		
метафосфат кальция $Ca(PO_3)_2$	—	—	0						0	0	0	—	—	0	—
сода Na_2CO_3	—	—	—	—	—	—	—	0	0	1	—	+	—		—
поташ K_2CO_3	—	—	—	—	—	—	—	0	0	1	—	+	—		—
Стекло:															
малощелочное (80% SiO_2)	0	0	0	—	0	0	0	0	1	1		—	1	—	0
богатое щелочами (60% SiO_2)	—	—	—	—	0	0	0	0	1	1		—	0	—	0
жидкое $Na_2O_{12}SiO_2$	—	—	1	—	—	—	—	0	1	1	—	—	—	—	—

* + — стойкий; 1 — ограниченно стойкий; 0 — умеренно стойкий; — не стойкий в виде плавов.

получают керамические стройматериалы, плотность которых равна плотности жидкости. Для поддержания высокой теплостойкости материала добавку флюсов в него следует производить в ограниченном количестве. В качестве флюсов применяют, например, окислы щелочных и щелочноземельных металлов (Na_2O, K_2O, CaO) и их соли.

Чем больше теплопроводность кирпичей, тем быстрее в блоке из кирпичей происходит выравнивание температур и тем меньше будет разность температур в блоке Но при одинаковой толщине тем меньше будут тепловые напряжения и тем более высокие нагрузки тепловых колебаний может выдержать такой материал.

Чем больше пористость материалов, тем меньше их теплопроводность, чем меньше размеры пор, тем меньше теплопроводность при увеличении температуры (табл. 43).

Таблица 43

Теплопроводность пористых стройматериалов

	Плотность, кг/м³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)
Крупнопористое пеностекло при 300 °С	300	0,016
Обожженные кирпичи из кизельгура при 500 °С	450	0,139
	650	0,186
Пористые кирпичи из шамота, при 500 °С	800	0,29
	1000	0,349
Пористые кирпичи из силиманита при 500 °С	1200	0,465
Крупнопористые кирпичи из динаса при 500 °С	1200	0,581

Механическая прочность кирпичей обычно тем меньше, чем легче стройматериал, из которого они изготовлены.

Предел прочности изоляционных кирпичей (из кизельгура) составляет около 1 МПа, пористых кирпичей из шамота — 3,5—10 МПа, а кирпичей из плотных материалов — до 100 МПа.

При кладке кирпичей в печи следует обращать внимание на механическую термостойкость материалов, например при кладке сводов, арок и пятовых стен.

При температурах свыше 1000 °С между различными стройматериалами могут возникать также реакции, ведущие к изменению прочности, например между динасом и магнезитом, динасом и доломитом или динасом и хромитом.

Днища плавильных ванн, в которых находятся плавы с более высокой плотностью, чем плотность стройматериала, должны выкладываться точно зашлифованными клинчатыми кирпичами выпуклой частью вниз, потому что просачивающийся через днище тяжелый расплав поднимает более легкую кирпичную кладку.

Небольшие повреждения кирпичной кладки химических печей исправляются самотвердеющими набивочными массами даже при горячей печи. Вид этой набивочной массы должен соответствовать имеющейся футеровке.

Кислую футеровку изготавливают из кремнеземистых огнеупорных материалов (состоящих в основном из окиси кремния), имеющих кислый характер. Наиболее часто для изготовления кислой футеровки применяют кварциты. Кремнеземистые материалы имеют температуру плавления от 1650 до 1710 °С и температуру начала деформации под нагрузкой 0,2 МПа 1400—1600 °С. Они хорошо противостоят воздействию кислых и основных шлаков.

Основную футеровку изготавливают из магнезитовых, известковых, доломитовых и других огнеупоров, в которых содержится преимущественно окись магния. Материалы отличаются высокой огнеупорностью, их температура плавления, как правило, выше 2000 °С; температура деформации при 0,2 МПа колеблется от 1600 до 1700 °С. Они хорошо противостоят воздействию основных шлаков.

Нейтральную футеровку до последнего времени специально не выделяли и относили к основной футеровке. Эта футеровка характеризуется большим содержанием амфотерных окислов (Al_2O_3, ZrO_2, Cr_2O_3). Для изготовления ее применяют: корунд, стабилизированную двуокись циркония, хромит, шпинели состава $MgO \cdot Al_2O_3$ и $MgO \cdot CrO_3$, хромомагнезитовые и магнезитохромитовые огнеупоры типа термостойких периклазошпинелевидных, циркониевые, форстеритовые, высокоглиноземистые огнеупоры, а также тугоплавкие безокисные соединения (карбиды, нитриды, силициды, бориды и др.). Температура плавления указанных высокоогнеупорных материалов колеблется от 2000 до 3000 °С. Они отличаются, как правило, высокой термостойкостью, сравнительно низким коэффициентом термического расширения и большой шлакоустойчивостью как к основным, так и к кислым шлакам.

В печах большое значение имеет термостойкость огнеупорных материалов, т. е. сохранение прочности при температурных колебаниях, возникающих при нагревании и охлаждении.

При одностороннем нагреве в огнеупорных материалах возникают напряжения растяжения на изгиб и срез; с увеличением коэффициента теплового расширения и толщины огнеупорного материала эти напряжения возрастают и уменьшаются при повышении упругости и коэффициента теплопроводности.

Величины напряжений, обусловленных материалами футеровки, будут тем больше, чем короче отрезок времени и выше температура одностороннего нагрева материала. Печи химической промышленности следует нагревать и охлаждать тем медленнее, чем больше чувствительность огнеупорных материалов к температурным колебаниям.

Кирпичи большой плотности являются менее эластичными по сравнению с пористыми кирпичами. В частности, у динасовых кирпичей в диапазоне температур до 200 °С тепловое расширение довольно значительное, еще довольно высокое оно и при температуре красного каления, а свыше этой температуры тепловое расширение уже не играет роли.

Магнезит расширяется также очень сильно, а алюмосиликаты и силикаты циркония, карбиды кремния расширяются умеренно.

Во избежание возникновения напряжений в толстостенных химических печах вследствие теплового расширения огнеупорных материалов в футеровке делают температурные швы, ширина которых соответствует расширению материалов. Тепловые напряжения могут приводить к растрескиванию кирпичей и к образованию трещин. Многие повреждения в химических печах возникают уже во время начального производственного периода, вследствие очень быстрого высыхания кирпичной футеровки и нагревания печи. Слишком быстрое охлаждение (холодное дутье, водяное орошение) может также привести к повреждениям футеровки (растрескивание головок и разрыхление структуры кирпичей).

Для руднотермических печей важное значение имеет удельное электросопротивление огнеупорного материала (табл. 44).

Таблица 44

Удельное электросопротивление огнеупорных материалов

Огнеупорный материал	Пористость, %	Удельное электросопротивление ρ, Ом·см при температуре (в °С)		
		800	1200	1400
Магнезитовый (88% MgO)	18	$5{,}8 \cdot 10^6$	17 000	560
Магнезитовый (90—95% MgO) . . .	17	$15 \cdot 10^6$	210 000	11 000
Хромомагнезитовый	19	$0{,}37 \cdot 10^6$	3 900	400
	14	$2{,}1 \cdot 10^6$	130 000	2 400
Шамотный (53% SiO_2, 42% Al_2O_3)	18	19 000	1 550	720
Муллитовый (32% SiO_2, 64% Al_2O_3)	26	$0{,}21 \cdot 10^6$	16 000	7 200
Муллитовый плавленый	1,5	25 000	1 700	760
Силикатный (97% SiO_2)	26	$0{,}36 \cdot 10^6$	10 500	3 300
Цирконовый (35% SiO_2, 65% ZrO_2)	30	$1{,}25 \cdot 10^6$	21 000	3 600
Форстеритовый	21	$1{,}45 \cdot 10^6$	11 500	680
Карборундовый	12	37 000	4 600	1 700
Корунд литой (99% Al_2O_3)	3,1	3 800	740	290

Основные конструктивные элементы печей, подлежащих футеровке. Большинство печей химических производств имеет некоторые общие конструктивные элементы, например: подину и выстилку, стены, арки, своды и т. д. Рассмотрим эти общие конструктивные элементы.

Подины и выстилки. Конструктивный элемент, ограничивающий реакционное пространство снизу, называется подиной. На подину воздействует высокая температура, масса материала и шлака. Подины обычно футеруют из высоко-, огне- и кислотоупорных материалов. Нижняя часть футеровки любой печи и борова, которая выстилается кирпичом, называется выстилкой. Выстилку футеруют независимо от условий работы печи менее огнеупорным материалом большим швом. Подины и выстилки бывают одно- (однослойными) или многорядными (многослойными).

Стенки. Конструктивный элемент, ограждающий реакционное пространство печи, топки, борова и каналов с боков, называется стенками. Стены бывают прямыми, закругленными и кольцевыми,

горизонтальными, вертикальными и наклонными. Их футеруют различными по толщине огне- и кислотоупорными материалами, а наружные — теплоизоляционными.

Арки предназначены для перекрытия проемов в стенках. Они могут быть плоскими, полуциркульными и лучковыми. Арки, направленные выпуклостью вниз, называются обратными.

Своды. Реакционное пространство печи между двумя стенками перекрывается сверху сводом. Своды могут быть плоскими, полуциркульными и лучковыми (распорными). Разновидностью свода является купол, перекрывающий сверху печь цилиндрической формы.

Купола бывают полуциркульными и лучковыми. Расстояние между стенками, на которые опирается свод, называется пролетом. При пролетах более метра плоские своды, набираемые из кирпича, подвешивают, и они называются подвесными. В настоящее время своды до 3 м выполняют из жаростойкого бетона, не требующими подвески. Своды бывают одно- и многослойными. Каждый слой называется окатом.

Пяты. Кирпичи или фасонные камни, которые воспринимают нагрузку арки или свода и передают их на стены, называются пятами.

Рабочие окна. Проемы в стенках печей, через которые загружают и выгружают материалы и изделия, называются рабочими окнами. Кроме рабочих окон, в стенах печей устраиваются отверстия для установки горелки или форсунки, а также лазы, гляделки для подсветки реакционной камеры и установки приборов КИП и автоматики. На своде печи устраиваются отверстия для электродов и загрузочных течек, отвода газов из печи.

Рекуператоры. Установки, предназначенные для использования тепла отходящих газов от реакционной камеры передачей его через стенку воздуха, поступающего в горелку, форсунку или другие теплоиспользующие установки, называются рекуператорами.

Рекуператоры бывают металлические и керамические. Керамические разделяются на два вида: с многоканальными камнями и с шамотными или шамотно-карборундовыми трубками.

Керамические камни кроме внутренних каналов на наружной поверхности имеют буртики для получения канала.

Дымовые каналы и воздухопроводы. Каналы, по которым транспортируются отходящие газы от печи или нагретый воздух от рекуператоров, могут быть как внутри печи, так и вне ее.

Подземный канал для транспортирования отходящих газов — боров, а надземный канал — дымопровод и наружный воздухопровод подлежат футеровке. Дымо- и воздухопроводы работают под давлением и поэтому для создания газоплотности заключаются в металлический кожух.

Шиберы. Их применяют в качестве отсекающих и регулирующих устройств на пути движения отходящих газов. Шибер представляет собой заслонку. Выдвинутый из корпуса язык его перекрывает частично или полностью сечение дымохода. Для более надежного

перекрытия борова или дымопровода шиберы устанавливают наклонно, чтобы язык своей тяжестью прижимался к направляющим корпуса.

Отсекающий шибер может находиться в крайнем верхнем или крайнем нижнем положении и в обоих случаях язык шибера не греется и поэтому он выполняется без водяного охлаждения. Регулирующие шиберы регулируют тягу в печи. Язык такого шибера находится в различных положениях и постоянно омывается потоком горячих отходящих газов и поэтому обязательно должен иметь водяное охлаждение или выполняться керамическим.

Дымовые трубы служат для удаления продуктов горения из печи в атмосферу. Их выполняют чисто металлическими, металлическими с футеровкой внутри, кирпичными и железобетонными с внутренней футеровкой из огне- или кислотоупорного материала.

Расчеты футеровки. Для любой конструкции печи расчетом определяют толщину футеровки, а также при необходимости производят расчет прочности футеровки при известной толщине и выбранных материалах.

Определение толщины футеровки. Общая толщина футеровки зависит от толщины огне- или кислотоупорного слоя и толщины теплоизоляционного слоя. Она также зависит от температуры внутренней и наружной поверхностей печи, от температуры окружающей среды, а также от размеров стандартного огнеупорного теплоизоляционного кирпича при футеровке кирпичами.

При определении температуры наружной поверхности исходят из требования техники безопасности эксплуатации печей, чтобы температура наружной поверхности печи не превышала 60 °С.

Экранируя наружную поверхность печи металлическим листом на высоту 1800 мм над обслуживающей площадкой, температуру наружной поверхности можно повысить до 120 °С, что приведет к уменьшению толщины огнеупорной футеровки в 2 раза и значительно облегчить массу печи.

Температуру окружающей среды для расчетов принимают равной +20 °С.

Температуру на внутренней стенке принимают равной температуре в реакционной камере.

Футеровку печи можно выполнять одно- (только из огне- или кислотоупорного материала) или многослойной (внутренний слой из огне- или кислотоупорного материала) и слоя из теплоизоляционных материалов: шамота-легковеса, асбестового листа или засыпки и т. д. Если температура на границе слоя из огнеупорного и теплоизоляционного слоев выше допустимой температуры для диатомового материала, то теплоизоляционный слой футеруют шамотом-легковесом.

Для определения толщины любой футеровки необходимо знать потери тепла через футеровку при известной температуре окружающей среды и температуре наружной поверхности печи (рис. 116). Для случая однослойной футеровки по известным потерям тепла через кладку и температуре внутренней поверхности футеровки и

выбранного огнеупорного материала определяют толщину (рис. 117). Для случая двухслойной футеровки из шамотного кирпича, шамотолегковеса или диатомита по известным потерям тепла через футеровку, температуре внутренней поверхности футеровки, задаваясь толщиной шамотного кирпича и материалом теплоизоляционного кирпича, по графикам (рис. 118 и 119) определяют толщину теплоизоляционного кирпича или, задаваясь толщиной теплоизоляционного кирпича, находят толщину огнеупорного кирпича.

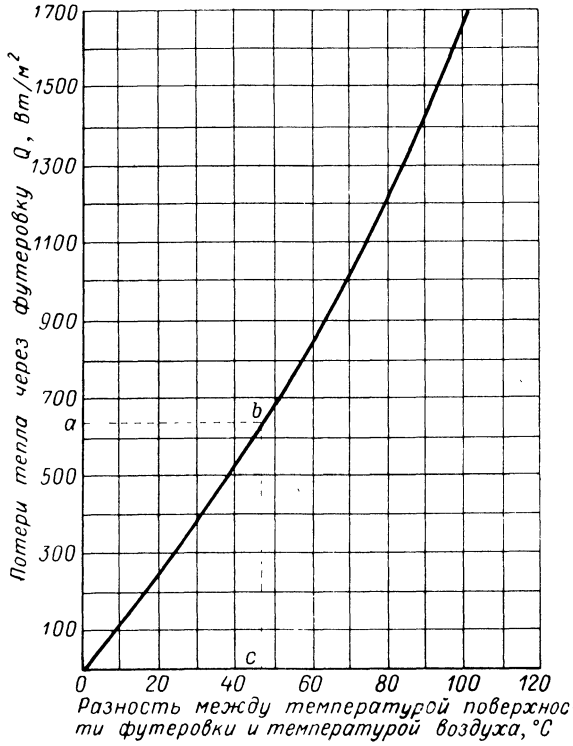


Рис. 116. Зависимость потери тепла через футеровки от разности температуры поверхности футеровки и от температуры окружающего воздуха.

Для общего случая многослойной футеровки по графику (рис. 120) определяют потери тепла через футеровку и при известной температуре внутренней поверхности футеровки находят общее термическое сопротивление футеровки $R_{общ}$. Далее, задаваясь материалами и толщиной теплоизоляционной футеровки, определяют термическое сопротивление теплоизоляционного слоя $R_{т\text{-}и}$. Значения $R_{т\text{-}и}$ находят в табл. 45 или по уравнению:

$$R_{т.\,и} = p\ell$$

где p — множитель, равный $\frac{1}{\lambda}$, м·°С/Вт; λ — коэффициент теплопроводности при средней температуре материала, Вт/(м·°С).

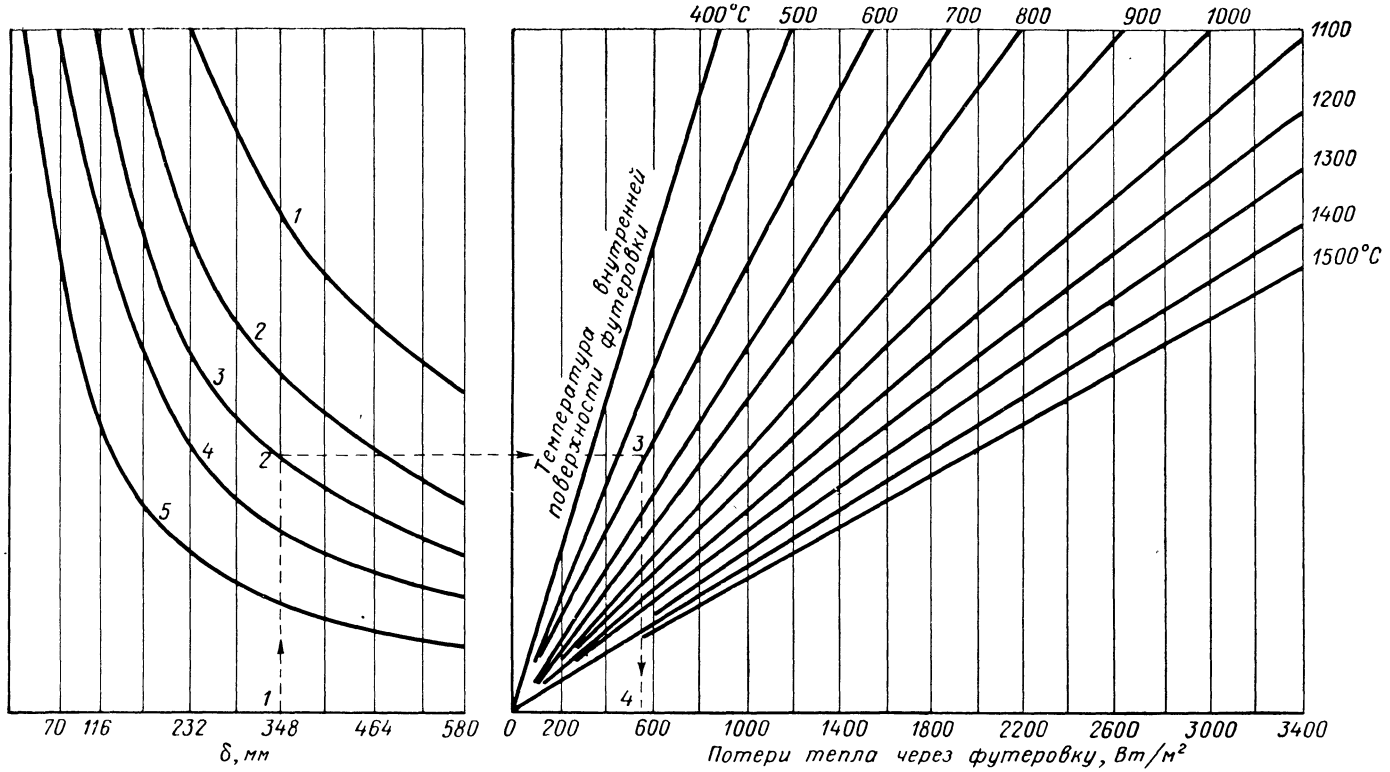


Рис. 117. График для определения потерь тепла через однослойную футеровку:

1 — шамот; *2* — шамот-легковес; БЛ-1,3; *3* — шамот-легковес БЛ-1,0; *4* — шамот-легковес БЛ-0,8; *5* — шамот-легковес БЛ-0,4.

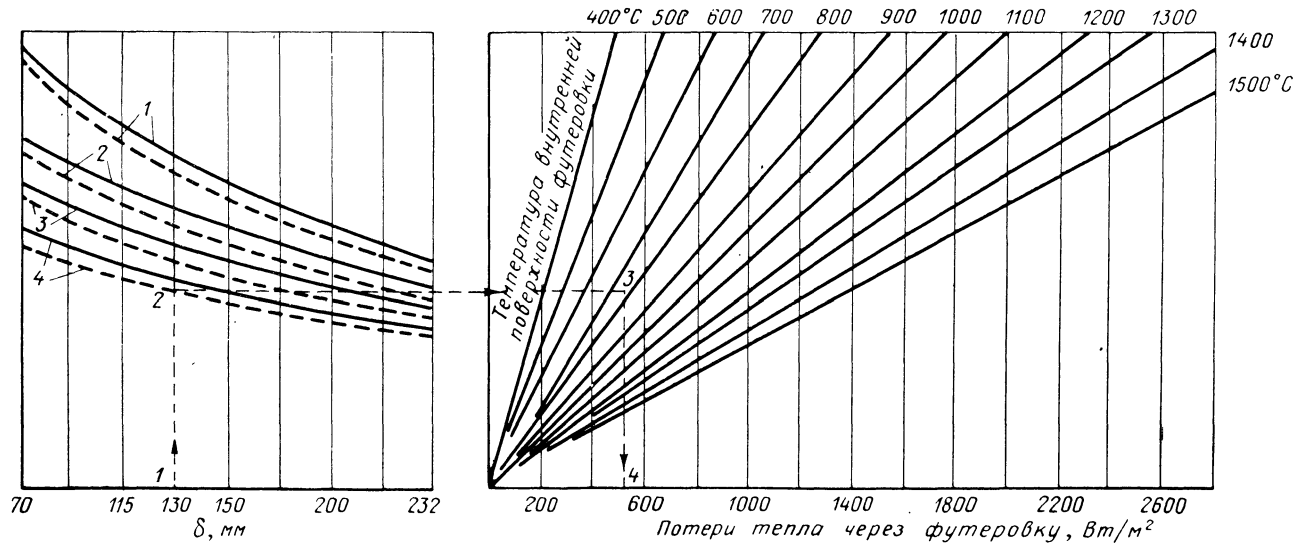


Рис. 118. График для определения потерь тепла через двухслойную футеровку:

1 — $\delta = 232$ мм; *2* — $\delta = 348$ мм; *3* — $\delta = 464$ мм; *4* — $\delta = 580$ мм; ——— шамот-легковес БЛ-08; — — — диатомовый кирпич 700.

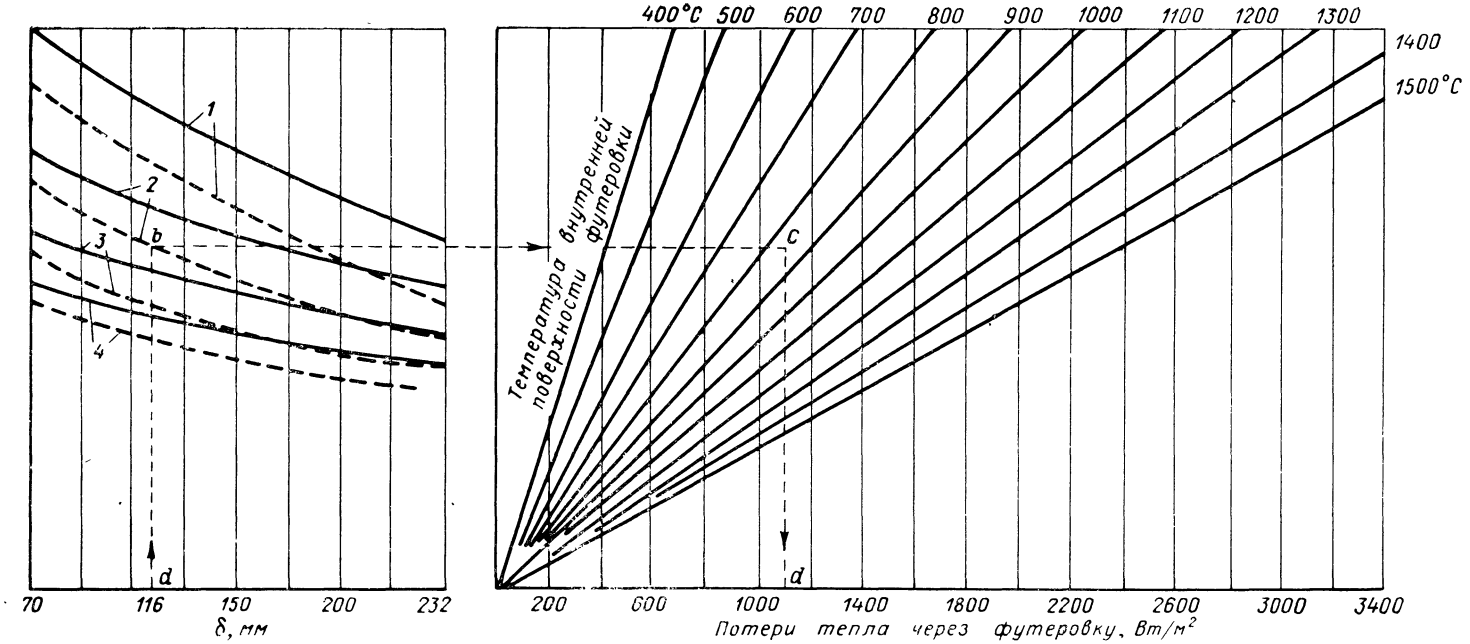


Рис. 119. График для определения потерь тепла через двухслойную футеровку:

1 — δ = 232 мм; *2* — δ = 348 мм; *3* — δ = 464 мм; *4* — δ = 580 мм; ——— шамот-легковес БЛ-1,3; — — — шамот-легковес БЛ-1,0.

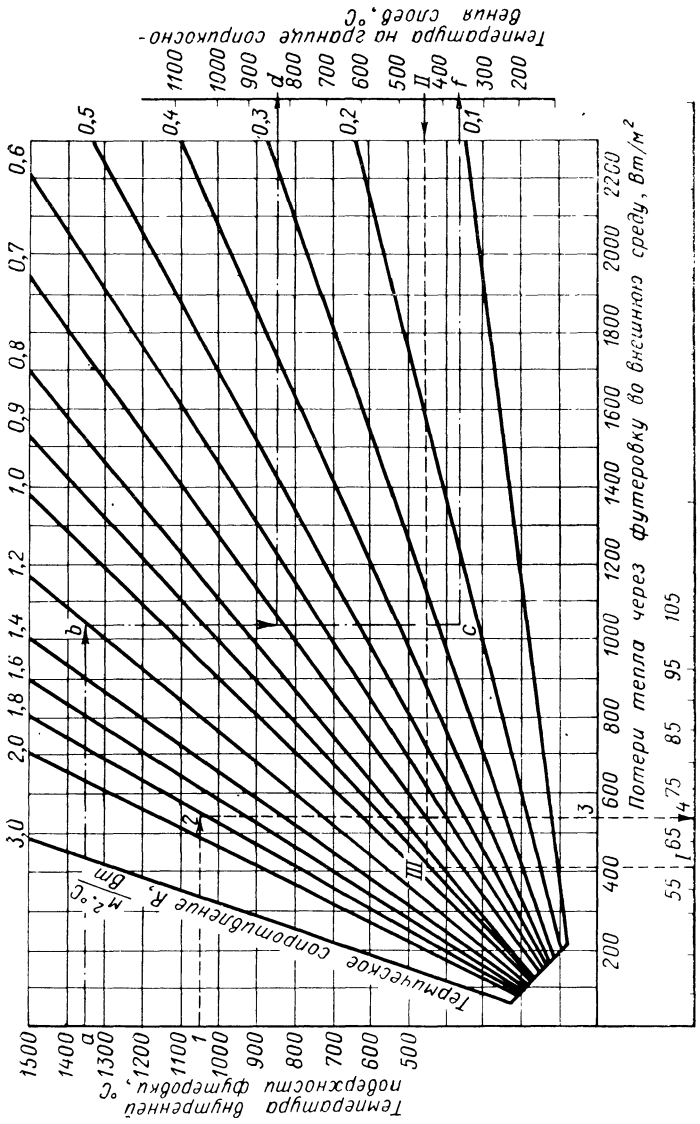


Рис. 120. График для определения потерь тепла через многослойную футеровку.

Таблица 45

Зависимость вспомогательного множителя $p = 1/\lambda$ (в м² · °С/Вт) от температуры

Материал	Средняя температура слоя $t_{ср}$, °С									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Кирпич высокоглиноземистый (муллитовый, коррундовый, и др.)	1,48	1,5	1,51	1,53	1,55	1,56	1,58	1,6	1,62	1,63
Кирпич динасовый	0,99	1,06	1,15	1,22	1,3	1,39	1,47	1,54	1,62	1,7
Кирпич карборундовый	2,84	2,88	2,93	2,97	3,01	3,06	3,1	3,14	3,19	3,23
Кирпич магнезитовый	3,66	3,62	3,58	3,53	3,5	3,44	3,39	3,35	3,32	3,27
Кирпич магнезитовохромитовый, хромомагнезитовый	1,68	1,66	1,64	1,62	1,6	1,59	1,57	1,55	1,53	1,52
Кирпич шамотный	1,1	1,06	1,02	1,0	0,97	0,95	0,92	0,9	0,87	0,85
Кирпич шамот-легковес (γ = 1300 кг/м³)	2,27	2,16	2,06	1,96	1,87	1,79	1,73	1,65	1,59	1,53
Кирпич шамот-легковес (γ = 1000 кг/м³)	3,76	3,5	3,26	3,05	2,87	2,7	2,56	2,42	2,33	2,21
Кирпич шамот-легковес (γ = 800 кг/м³)	5,66	4,92	4,37	3,91	3,56	3,24	3,0	2,77	2,6	2,42
Кирпич шамот-легковес (γ = 400 кг/м³)	8,87	7,56	6,57	5,81	5,22	4,73	4,33	3,98	3,71	3,44
Кирпич кислотоупорный	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Кирпич пенодиатомовый	8,61	7,18	6,15	5,39	4,78	4,31	3,91	3,59	3,34	3,07
Кирпич диатомовый (γ = 700 кг/м³)	5,28	4,53	3,97	3,53	3,18	2,89	2,65	2,44	2,29	2,12
Кирпич диатомовый (γ = 600 кг/м³)	6,15	5,39	4,78	4,31	3,91	3,59	3,31	3,13	3,07	2,69
Кирпич диатомовый (γ = 500 кг/м³)	7,18	6,15	5,39	4,78	4,31	3,91	3,58	3,31	3,09	2,87
Плиты совелитовые (γ = 350 кг/м³)	10,59	8,87	7,62	6,67	5,93	5,34	4,87	4,46	4,09	3,82
Плиты совелитовые (γ = 300 кг/м³)	9,56	7,9	6,73	5,86	5,16	4,65	4,22	3,86	3,49	3,3
Засыпка вермикулитовая	10,34	8,13	6,67	5,67	4,92	4,35	3,9	3,53	3,16	2,97
Маты минераловатные (в металлических сетках)	12,84	10,34	9,21	7,5	6,57	5,86	5,28	4,81	4,33	4,08
Кирпич глиняный обыкновенный	1,94	1,76	1,62	1,49	1,39	1,29	1,22	1,15	1,09	1,02

Зная сумму $R_{т.\,и}^{общ}$, определяют термическое сопротивление огнеупорного слоя $R_{о.\,м}$:

$$R_{о.\,м} = R_{общ} - R_{т.\,и}^{общ}$$

При принятом огнеупорном материале и известном множителе p рассчитывают толщину огнеупорного слоя по формуле:

$$\delta = R_{о.\,м}/p$$

где δ — толщина огнеупорного материала, м.

Так же можно определить толщину любого слоя из теплоизоляционного материала, если задаваться толщиной огнеупорного материала и других теплоизоляционных материалов, входящих в композицию слоя. Температуру на плоскости соприкосновения слоев определяют по графику (рис. 121, 122).

Расчет прочности футеровки при необходимости производят по несущей способности (прочности и устойчивости), а также по образованию или раскрытию швов для конструкций, в которых по условиям эксплуатации образование трещин и раскрытие швов не допускается или их раскрытие должно быть ограничено.

Расчет по несущей способности производят на воздействие только расчетных нагрузок, а расчет по образованию трещин или раскрытию швов производят на воздействие расчетных или нормативных нагрузок.

Расчет прочности футеровки по несущей способности при температуре до 50 °С. Нормативными характеристиками футеровки, определяющими ее прочность, является марка кирпича и марка раствора. Под наименованием марки имеется ввиду временное сопротивление сжатию в паскалях.

Расчет *футеровки элементов печи при центральном сжатии* производится по формуле:

$$N_{пр} \leqslant \varphi RF$$

где $N_{пр}$ — приведенная продольная сила, определяемая по формуле $N_{пр} = \frac{N_{дл}}{m_{дл}} + N_{кр}$ [здесь $N_{дл}$ — расчетная продольная сила от длительно действующей части нагрузки; $N_{кр}$ — расчетная продольная сила от кратковременно действующей части нагрузки; $m_{дл}$ — коэффициент, учитывающий влияние длительного действия нагрузки на несущую способность элементов толщиной менее 30 см или с радиусом инерции сечения менее 8,7 см. Для элементов толщиной 30 см и более или с радиусом сечения 8,7 см и более коэффициент $m_{дл}$ принимается равным единице (табл. 46)]; φ — коэффициент продольного изгиба, учитывающий снижение несущей способности сжатых элементов постоянного по длине сечения при продольном изгибе, зависящей от гибкости элемента λr или для прямоугольного сплошного сечения $\lambda \frac{h}{a}$ и упругой характеристики футеровки (табл. 47):

a	1000—750	500
Марка раствора	200—25	10

h — меньший размер прямоугольного сечения; r — меньший радиус инерции сечения элемента; R — расчетное сопротивление футеровки сжатию (определяют по табл. 48); F — площадь сечения футеровки элемента.

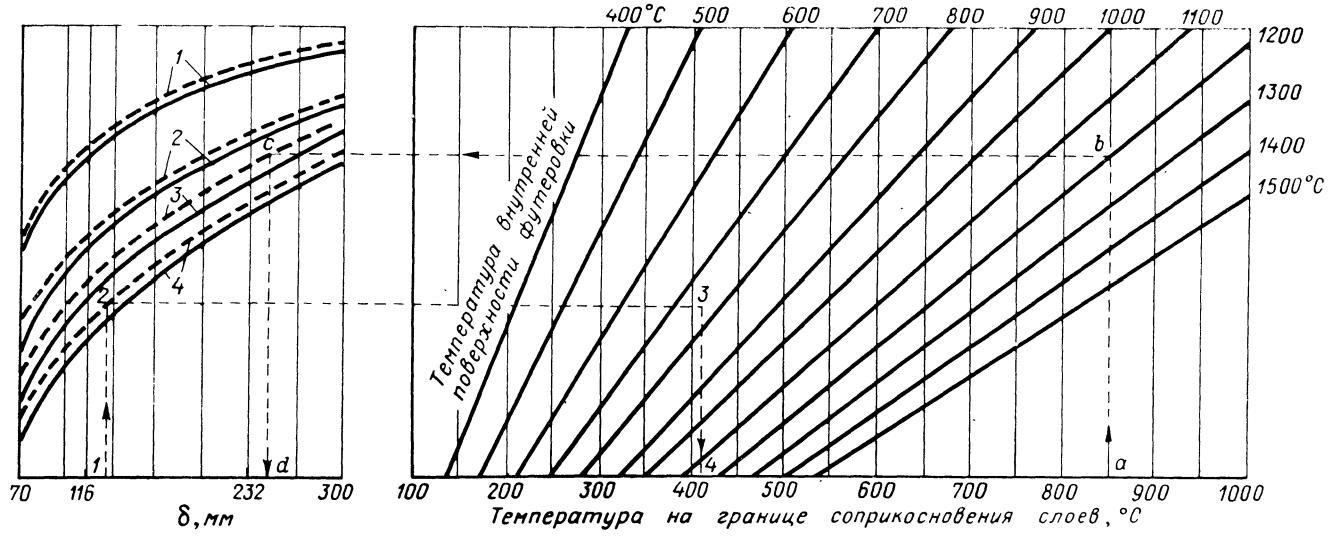


Рис. 121. График для определения температуры на границе соприкосновения слоев:

1 — δ = 232 мм; *2* — δ = 348 мм; *3* — δ = 464 мм; *4* — δ = 580 мм; ——— шамот-легковес БЛ-0,8; — — — диатомовый кирпич 700.

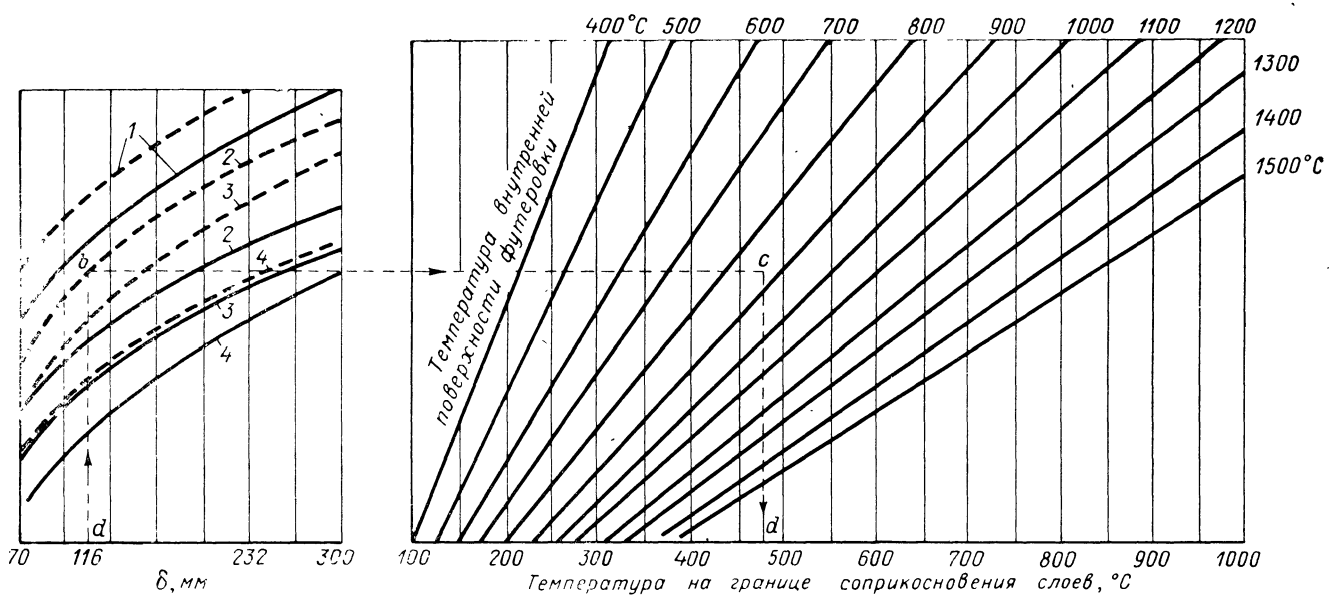


Рис. 122. График для определения температуры на границе соприкосновения слоев:

1 — δ = 232 мм; *2* — δ = 348 мм; *3* — δ = 464 мм; *4* — δ = 580 мм; ——— шамот-легковес БЛ-1,3; — — — шамот-легковес БЛ-1,0.

Таблица 46

Коэффициент $m_{дл}$

Гибкость		Коэффициент $m_{дл}$	Гибкость		Коэффициент $m_{дл}$
λ^h	λ^r		λ^h	λ^r	
8	28	1,00	26	90	0,63
10	35	0,96	28	97	0,59
12	42	0,92	30	104	0,55
14	49	0,88	32	111	0,51
16	56	0,84	34	118	0,47
18	63	0,80	36	125	0,43
20	70	0,75	38	132	0,39
22	76	0,71	40	139	0,34
24	83	0,67	42	146	0,29

Таблица 47

Коэффициент продольного изгиба φ

$\lambda^h_{пр}$	$\lambda^r_{пр}$	Коэффициент продольного изгиба φ	$\lambda^h_{пр}$	$\lambda^r_{пр}$	Коэффициент продольного изгиба φ
4	14,0	1,00	15	52,5	0,77
5	17,5	0,98	16	56,0	0,74
6	21,0	0,96	18	68,0	0,70
7	24,5	0,34	20	70,0	0,65
8	28,0	0,92	22	76,0	0,61
9	31,5	0,90	24	83,0	0,56
10	35,0	0,88	26	90,0	0,52
11	38,5	0,86	28	97,0	0,49
12	42,0	0,84	30	104,0	0,45
13	45,5	0,81			
14	49,0	0,79			

Таблица 48

Расчетные сопротивления R сжатию кладки из кирпича

Марка кирпича	Расчетные сопротивления R, МПа									
	при марке раствора								при прочности раствора	
	200	150	100	75	50	25	10	4	0,2 МПа	нулевой
300	3,9	3,6	3,3	3,0	2,8	2,5	2,2	1,8	1,7	1,5
250	3,6	3,3	3,0	2,8	2,5	2,2	1,9	1,6	1,5	1,3
200	3,2	3,0	2,7	2,5	2,2	1,8	1,6	1,4	1,3	1,0
150	2,6	2,4	2,2	2,0	1,8	1,5	1,3	1,2	1,0	0,8
125	—	2,2	2,0	1,9	1,7	1,4	1,2	1,1	0,9	0,7
100	—	2,0	1,8	1,7	1,5	1,3	1,0	0,9	0,8	0,6
75	—	—	1,5	1,4	1,3	1,1	0,9	0,7	0,6	0,5
50	—	—	—	1,1	1,0	0,9	0,7	0,6	0,5	0,35
35	—	—	—	0,9	0,8	0,7	0,6	0,45	0,4	0,25

Гибкость элемента:

$$\lambda_{\text{пр}}^{h} = \lambda^{h}\sqrt{\frac{1000}{a}} = \frac{l_0}{h}\sqrt{\frac{1000}{a}}$$

$$\lambda_{\text{пр}}^{r} = \lambda^{r}\sqrt{\frac{1000}{a}} = \frac{l_0}{r}\sqrt{\frac{1000}{a}}$$

где l_0 — расчетная высота элемента конструкции.

Расчет *внецентренно сжатых элементов футеровки* производят по формуле:

$$N \leqslant m_{\text{дл}}\varphi_1 R F_{\text{с}}\omega$$

для прямоугольного сечения по формуле:

$$N \leqslant m_{\text{дл}}\varphi_1 R F\left(1-\frac{2e_0}{h}\right)\omega$$

где $\varphi_1 = \varphi\left[1-\frac{e_0}{h}\left(0{,}006\frac{l_0}{h_{\text{э}}}-0{,}2\right)\right]$; N — сжимающая сила; h — высота сечения (в направлении действия изгибающего момента); $F_{\text{с}}$ — площадь сжатой части сечения, которую определяют в предположении прямоугольной эпюры напряжения сжатия. Центр тяжести сжатой части сечения совпадает с точкой приложения внешней снимающей силы N и положения границы площади $F_{\text{с}}$ определяется из условия равенства нулю статического момента этой площади относительно ее центра тяжести; e_0 — эксцентриситет продольной силы относительно центра тяжести сечения; $h_{\text{э}}$ — $3{,}5r$ (здесь r — радиус инерции сечения в направлении действия изгибающего момента для прямоугольного сечения $h_{\text{э}} = h$); ω — коэффициент, равный для сечений произвольной формы $\omega = 1 + e_0/3y \leqslant 1{,}25$ и для прямоугольных сечений $\omega = 1 + e_0/1{,}5h \leqslant 1{,}25$.

Значения $m_{\text{дл}}$, R, φ приведены в табл. 46 и 47.

Расчет *элементов футеровки на прочность при осевом растяжении* производят по формуле:

$$N \leqslant R_{\text{р}}F$$

где N — растягивающая сила; $R_{\text{р}}$ — расчетное сопротивление футеровки растяжению по перевязанному сечению, значение которого при растворе марки 50—100 следует принимать 0,16 МПа.

Проектирование футеровки, работающей на центральное растяжение по неперевязанным сечениям, не допускается.

Расчет *элементов футеровки на срез* производят по формуле:

$$Q \leqslant (R_{\text{ср}} + 0{,}8f\sigma_0)F$$

где Q — расчетная поперечная сила; $R_{\text{ср}}$ — расчетное сопротивление футеровки срезу, значение которого по неперевязанному сечению при растворе марки 50 и выше следует принимать равным 0,16 МПа. Расчетное сопротивление футеровки срезу по перевязанному сечению при разрушении кладки по кирпичу следует принимать равным 8 (при кирпиче марки 150) и 1,0 МПа (при кирпиче марки 200); f — коэффициент трения по шву футеровки принимается равным 0,7; σ_0 — среднее напряжение сжатия при наименьшей расчетной продольной нагрузке, подсчитанное с коэффициентом перегрузки 0,9; F — расчетная площадь сечения.

Расчет сечений футеровки при местном сжатии (смятии), если нагрузка распределяется на части площади, следует вести по формуле:

$$N \leqslant \mu a R_{\text{см}}F_{\text{см}}$$

где N — величина местной нагрузки; μ — коэффициент полноты эпюры давления от местной нагрузки (при равномерном распределении давления $\mu = 1$; при треугольной эпюре давления $\mu = 0{,}5$); $a = 1{,}5-0{,}5\mu$.

Расчетное сопротивление футеровки $R_{см}$ при местном сжатии (смятии) находят по формулам:

$$R_{см} = \gamma R; \quad \gamma = \sqrt[3]{\frac{F}{F_{см}}} \leqslant \gamma_1$$

где F — расчетная площадь сечения в зависимости от местной нагрузки; $F_{см}$ — площадь смятия или сжатия, на которую передается нагрузка; γ_1 — коэффициент, зависящий от материала футеровки и места приложения нагрузки, принимается равным от 1,5—2,0.

Расчет *элементов футеровки на изгиб* следует производить по формуле:

$$M \leqslant R_{р.\,и} W$$

где M — расчетный изгибающий момент; $R_{р.\,и}$ — расчетное сопротивление футеровки растяжению при изгибе по перевязанному сечению (см. табл. 49); W — момент сопротивления сечения футеровки на упругость.

Таблица 49

Расчетные сопротивления футеровки из кирпича правильной формы осевому растяжению $R_р$, растяжению при изгибе $R_{р.\,и}$, срезу $R_{ср}$ и главным растягивающим напряжениям при изгибе $R_{гл}$ при расчете футеровки по перевязанному сечению, проходящему по кирпичу

Вид напряженного состояния	Расчетное сопротивление (в МПа) при марке кирпичей								
	20,0	15,0	10,0	7,5	5,0	3,5	2,5	1,5	1,0
Осевое растяжение $R_р$	2,5	2,0	1,8	1,3	1,0	0,8	0,6	0,5	0,3
Растяжение при изгибе $R_{р.\,и}$ и главные растягивающие напряжения $R_{гл}$	4,0	3,0	2,5	2,0	1,6	1,2	1,0	0,7	0,5
Срез $R_{ср}$	10,0	8,0	6,5	5,5	4,0	3,0	2,0	1,4	0,9

Проектирование элементов футеровки, работающих на изгиб по неперевязанному сечению, не допускается.

Расчет *элементов футеровки на поперечную силу при изгибе* следует производить по формуле:

$$Q \leqslant R_{гл} b z$$

где Q — расчетная поперечная сила; $R_{гл}$ — расчетное сопротивление кладки главным растягивающим напряжением при изгибе приведено в табл. 49; b — ширина сечения; z — плечо внутренней пары сил, для прямоугольного сечения $z = 2/3h$.

Расчет устойчивости футеровки. Футеровку печей, выполненную из кирпичей, и свободно стоящие стены, имеющие прямоугольную форму и значительную высоту, проверяют на допустимые отношения высоты стен и столбов к их толщинам

$$\beta = H/h$$

где H — высота футеровки; h — толщина стены или меньшая сторона прямоугольного сечения столба при свободной длине стены l менее $2{,}5H$ не должна превышать величин, приведенных ниже:

Марки раствора	50 и выше	25	10	4 и ниже
β	25	22	20	—

Для стен и столбов сложного сечения вместо h принимается условная толщина $h' = 3{,}5\,r$ (где $r = \sqrt{1/F}$).

Для столбов круглого и многоугольного сечения, вписанного в окружность $h' = 0{,}85d$ (где d — диаметр сечения столба).

При высоте футеровки H больше свободной длины L отношение L/h не должно превышать значений $\beta = H/h$.

Предельные отношения β для стен и перегородок умножают на коэффициент R, если условия отличаются от приведенных здесь:

Характеристика стен и перегородок	Поправочные коэффициенты
Стены и перегородки, не несущие нагрузки, при толщине:	
25 см и более	1,2
15 см и менее	1,6
Перегородки с проемами	0,9
При свободной длине стен между примыкающими поперечными стенами более $2{,}5H$	0,9
То же, более $3{,}5\,H$ и для нераскрепленных в вертикальных сечениях стен	0,8

Предельные отношения β для столбов принимают следующие:

Толщина столбов, см	90 и более	70—89	50—69	Менее 50
β	0,75	0,70	0,65	0,60

Расчет устойчивости цилиндрических футеровок. Футеровку печи цилиндрической формы с металлическим кожухом следует проверять на местную устойчивость. При расчете таких футеровок определяют напряжения в нижнем наиболее напряженном сечении от собственной массы футеровки по формуле:

$$\sigma_ф = \gamma H$$

где $\sigma_ф$ — напряжение футеровки; γ — объемная масса футеровки; H — высота футеровки.

Вычисленные напряжения в горизонтальном сечении футеровки должны удовлетворять условию устойчивости

$$\sigma_ф \leqslant E_0 h/16r$$

где E_0 — начальный модуль упругости футеровки при сжатии

$$E_0 = aR^н$$

[Здесь a — упругая характеристика кладки; $R^н$ — нормативное сопротивление кладки сжатию; $R^н = 2R$ (см. стр. 310)]; h — высота сечения вертикальной стенки цилиндрической футеровки; r — средний радиус горизонтального сечения футеровки.

Расчет элементов футеровки по раскрытию швов при обычной температуре (до 20 °С). Если по условиям эксплуатации печи раскрытие швов футеровки не допускается, то футеровку необходимо проверить на раскрытие швов. Расчет элементов футеровки на раскрытие швов кладки производят на воздействие расчетных нагрузок по формуле:

$$N \leqslant \frac{[m_{тр}R_{р.\,и}F}{\frac{Fe_0}{W}} = \frac{m_{тр}R_{р.\,и}F}{\frac{F(h-y)e_0}{I} - 1}$$

где N — расчетная продольная сила; $m_{тр}$ — коэффициент условий работы кладки по раскрытию швов кладки, принимается от 1,5 до 3; $R_{р.\,и}$ — расчетное сопротивление кладки на растяжение при изгибе; y и h — расстояния от центра тяжести сечения до края сечения; W — момент сопротивления кладки при упругой ее работе; I — момент инерции сечения.

Расчет футеровки печи на действие высокой температуры и внешней нагрузки. При нагревании футеровки печи с внутренней стороны выше 50 °С ее расчет по несущей способности (прочности и устойчивости) можно производить по тем же формулам, по которым производится расчет не нагретой кладки, однако с учетом изменения физико-механических характеристик кладки (прочности, модуля упругости и пр.) при нагревании. Изменения этих характеристик в зависимости от температуры устанавливают на основании экспериментальных данных. Расчет футеровки, нагреваемой с внутренней стороны, на раскрытие швов кладки не производят, так как футеровка практически не может работать без раскрытия швов в растянутой зоне из-за возникновения температурного перепада по толщине.

Общие правила кладки огнеупорной футеровки печей. *Чертежи печей.* Основными документами, по которым производят кладку футеровочного материала печи, служат рабочие чертежи. В них приводится общий вид футеровки, поперечные и продольные разрезы со всеми необходимыми размерами.

На чертежах футеровки печи указывается: с чего начинается кладка выстилки, во сколько рядов и при каком положении кирпича она укладывается, какие огне- и кислотоупорные материалы используются при кладке, нанесено также положение оси стены или ее боковой поверхности в привязке к оси симметрии печи, или оси симметрии борова, который в свою очередь привязан к оси симметрии печи. Указана также толщина стены. Если стена имеет проем, то в чертеже положение проема дано по длине и высоте стены, а также приведены его размеры.

Для кладки свода указывается положение центра окружности свода и ее радиус, а также порядок чередования в своде прямых и клиновых кирпичей.

На чертежах цилиндрических печей приведены диаметр, толщина и высоты кольцевой стены. Если стена коническая, то даются нижний и верхний диаметры, высота и толщина конической стены.

При толстых стенах, образованных несколькими кольцами кирпича, даются порядовочные чертежи. На этих чертежах приводятся указания, из каких кирпичей выкладывать 1-е, 2-е и следующие кольца в четном ряду и из каких в нечетном, чтобы правильно перевязывать кольцевые швы.

Кроме того, на чертежах футеровки обязательно показывают местоположение, конструкцию и размер (ширина) температурных швов, а также дают указания о заполнении швов выгорающим материалом, асбестовым шнуром, глиной и т. д.

При футеровке печи фасонными кирпичами, необходимо выполнять чертеж раскладки фасонин.

В тех случаях, когда нужно сложить наклонную стену или подину, на чертежах указывается угол наклона в градусах или размеры наклонной стены или подины.

На чертежах отражаются все необходимые указания, которые позволяют в точности обеспечить заданные геометрические формы, с соблюдением заданных размеров и применять те материалы, которые приняты в рабочих чертежах печи.

Основные требования к качеству огнеупорной футеровки.

1. Для обеспечения огнеупорности футеровки, необходимо применять огне- или кислотоупорный кирпич и растворы, только указанные в чертежах. Нельзя применять кирпич с отбитыми углами, кромками и ребрами. Раствор должен быть приготовлен из материалов, указанных в чертежах, и той густоты, которая соответствует заданной толщине шва.

2. Геометрическую форму и размеры футеровки необходимо соблюдать в соответствии чертежу.

3. Отсутствие на поверхности футеровки впадин и выпуклостей проверяют правилом и рейкой.

4. Выступающие кирпичи правилом осаживают вглубь кладки, запавшие выдвигают и укладывают в правильное положение.

5. Прочность футеровки обеспечивается перевязкой вертикальных, продольных и поперечных швов.

6. Герметичность и химическая стойкость футеровки достигается тщательным заполнением швов раствором указанного в чертежах состава. Толщина швов не должна превышать, указанной в чертежах.

7. Для обеспечения сохранности футеровки и ее размера при воздействии высоких температур устраивают в указанном в чертежах месте температурные швы.

8. При кладке сводов и арок радиальные швы необходимо вести строго по радиусу. Толщина швов должна соответствовать указанной в чертежах. Замковые кирпичи должны быть плотно посажены.

Перевязка швов и температурные швы. Швом в кирпичной кладке называется место примыкания одного кирпича к другому, заполненное раствором. Чем тоньше шов и чем лучше он заполнен раствором, тем прочней и долговечней футеровка.

В зависимости от толщины швов, т. е. в зависимости от тщательности выполнения футеровки, ее разделяют на следующие категории:

	Толщина шва, мм
Особо тщательная	Не более 1
Тщательная	Не более 2
Обыкновенная	Не более 3
Грубая	Более 3
Вне категории	0,5

По положению в пространстве швы разделяют на горизонтальные и вертикальные. По положению относительно продольной оси конструктивного элемента, например стены, вертикальные швы разделяют на поперечные и продольные.

Для предупреждения расслоения футеровки и для повышения герметичности ее вертикальные швы перевязывают. Горизонтальные швы как правило не перевязывают. Поперечные швы перевязывают только по высоте кирпичами следующего ряда.

При нагревании футеровка печи расширяется. Для обеспечения сохранности футеровки от выпучивания и разрушения необходимо предусматривать температурные швы. Их создают закладкой в швы футеровки выгорающих прокладок из деревянных досок или

заполняют сжимаемыми материалами, например, глиной с асбестом или асбестовым шнуром. Температурные швы не должны ослаблять прочности футеровки и не пропускать воздух, газы, шлаки жидкого металла.

Температурные швы выполняют змейкой или отрезными. Шов змейкой представляет собой ломаную линию, получающуюся в результате смещения в каждом ряду вертикальных поперечных швов относительно шва лежащего ниже ряда. Такие швы обычно устраивают в середине стен. Отрезные швы устраивают, как правило, в конце стен, сводов, выстилок и других конструктивных элементов в виде прямой линии. Если стена выполняется в несколько слоев, то температурные швы устраивают вразбежку, т. е. со смещением по толщине, чтобы не было сквозной щели через всю стену.

Выбор шва зависит от конструкции печи, материала футеровки и воздействующей на нее температуры.

Размер шва определяется с учетом коэффициента линейного расширения футеровки. Типовые конструкции температурных швов приведены в рис. 123. Средние величины температурных швов в зависимости от материала футеровки следующие:

Материал	Шамот	Тальк	Динас	Хромомагнезит	Магнезит
Шов, мм на 1 м кладки	5—6	8—10	12	12	12—14

В сводах температурные швы устраивают в местах их примыкания к торцевым стенам. При этом обеспечивается возможность беспрепятственного увеличения объема свода и стен. В длинных сводах, протяженностью более 5 м, температурные швы устраивают по середине свода. Швы делают разрезными и сверху такие швы перекрывают кирпичами, чтобы предупредить подсос воздуха в печь или выбивание из нее пламени газов.

К л а д к а с т е н. Каждая грань кирпича или его сторона имеет определенное наименование. Самая большая сторона называется плашкой, средняя — ребром, самая малая — торцом. Кирпич можно укладывать на плашку, на ребро или на торец. Кладку стен в основном ведут на плашку (рис. 124).

При кладке стен в плашку различают два положения кирпича в ряду. Когда длинная сторона, т. е. ребро, направлена вдоль стены по ее лицевой поверхности, кладку называют ложковой. Если длинная сторона кирпича направлена поперек стены, т. е. когда на лицевую поверхность стены выходит торец кирпича, кладку называют тычковой.

Кладку прямых стен толщиной в полкирпича выполняют ложковой кладкой с перевязкой вертикальных швов. Расстояние между швами в смежных по высоте рядах равняется половине кирпича. Чтобы перевязать швы, необходимо нечетные ряды начинать с укладкой целого кирпича, а четные с половинки, или наоборот.

Стены толщиной в один кирпич выкладываются тычковыми рядами. Расстояние между вертикальными швами в смежных по высоте

рядах составляет четверть кирпича. Для перевязки рядов в начале четных рядов укладывают трехчетверки.

Стены толщиной в полтора кирпича выкладывают из тычковых и ложковых рядов. Перевязка вертикального продольного шва

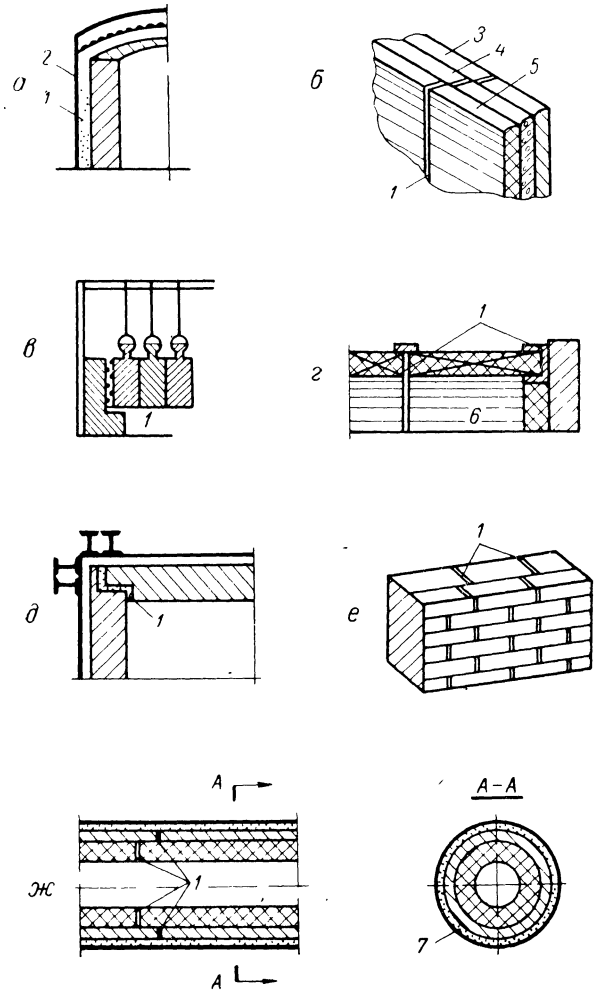


Рис. 123. Конструкции температурных швов:

а — в радиальных стенах; *б* — в прямых стенах; *в* и *г* — в сводах; *д* — в углах стен; *е* — в прямых стенах; *ж* — в газопроводах и вращающихся печах. *1* — температурный шов; *2* — кожух; *3* — кладка из красного кирпича; *4* — изоляционная кладка; *5* — огнеупорная кладка; *6* — торцевая стена; *7* — кольцевой температурный шов.

осуществляется взаимной заменой ложкового и тычкового ряда в четных рядах кладки относительно нечетных. При этом перевязываются и вертикальные поперечные швы за счет укладки в начало тычкового ряда двух трехчетверток.

Стены толщиной в два кирпича выкладывают четный ряд из тычковых кирпичей, а нечетные — из ложковых по краям и тычковых по середине. При такой кладке перевязываются продольные вертикальные швы; перевязка поперечных вертикальных швов достигается укладкой трехчетверток в начале ложкового и тычкового рядов.

Рекомендуемая толщина кладки стен приведена в табл. 50.

К л а д к а с в о д о в и а р о к. Существует два способа кладки сводов — кольцами и в перевязку. В своде, выполненном

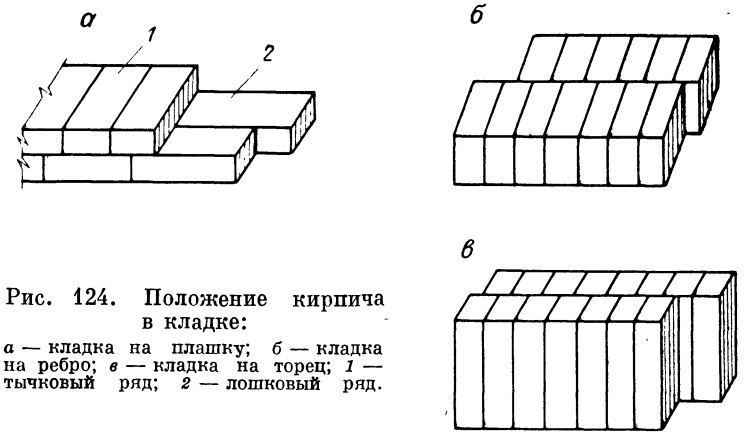


Рис. 124. Положение кирпича в кладке:
а — кладка на плашку; *б* — кладка на ребро; *в* — кладка на торец; *1* — тычковый ряд; *2* — ложковый ряд.

кольцами, каждый кирпич зажат двумя соседними кирпичами. При разгаре свода, т. е. при уменьшении толщины в результате оплавления или отколов, достаточно одному кирпичу провиснуть и упасть, чтобы упало еще несколько кирпичей или все кольцо, и свод необходимо будет ремонтировать.

Таблица 50

Рекомендуемые толщины футеровки стен

Высота стены, м	Температура в рабочей камере, °С	Рабочий огнеупорный слой		Наружный огнеупорный слой	
		материал	толщина, мм	материал	толщина, мм
До 1	$<$ 1200	Шамот класса Б	113	Диатомит или пеношамот	230
До 1	$\geqslant$ 1200	То же	230	То же	113—230
Более 1	$\leqslant$ 1200	»	230	»	230
Более 1	$>$ 1200	Шамот класса А	230—348	»	230

В своде, выполненном в перевязку, каждый кирпич зажат четырьмя соседними кирпичами. И если один из этих четырех соседних кирпичей в результате разгара ослабнет, провиснет и упадет, то оставшиеся кирпичи будут удерживаться давлением на них еще трех кирпичей. Но если условия для разгара свода не будут устра-

нены, то кирпичи будут выпадать один за другим на большом участке и потребуется остановка печи для производства ремонта.

От величины пролета свода зависит и его толщина. При пролете 1—1,5 м толщина свода в полкирпича; при пролете 1,5—2,5 м — в один кирпич. При большом пролете применяют кирпичи длиной 3,0—5,0 м, либо выкладывают свод в несколько окатов без перевязки между собой. Конструкция сводов показана на рис. 125.

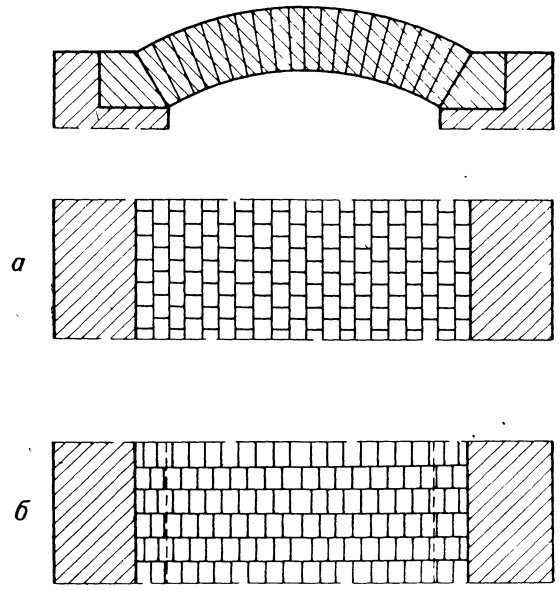


Рис. 125. Кладка сводов:
а — вперевязку; *б* — кольцами.

Рекомендуемые толщины прочного свода приведены в табл. 51.

Не рекомендуется без особых оснований предусматривать в проектах печей арки и своды с центральным углом меньше 60 °С.

Свод выкладывается из клиновых кирпичей. Если требуется выложить заданный свод из двух марок клинового кирпича, то,

Таблица 51

Рекомендуемые толщины свода печей

Толщина свода, мм	Ширина пролета, м		
	до 1 м	от 1 до 3,5 м	более 3,5
Огнеупорный слой	116—230	230—250	250—300
Изоляционный слой	65—113	65—230	113—230

пользуясь формулами Гросса, можно определить необходимое количество клиновых кирпичей:

$$n=\frac{2\pi d\,[(R+H)\,a_2-Rb_2]}{360\,(b_1a_2-a_1b_2)};\qquad m=\frac{2\pi d\,[Rb_1-(R+H)\,a_1]}{360\,(b_1a_2-a_1b_2)}$$

где n — число кирпичей первого клина; m — число кирпичей второго клина; α — центральный угол свода, градусы; R — внутренний радиус свода, мм; H — толщина свода, мм; a_1 — внутренняя толщина первого клина с учетом шва, мм; a_2 — внутренняя толщина второго клина с учетом шва, мм; b_1 — наружная толщина первого клина с учетом шва, мм; b_2 — наружная толщина второго клина с учетом шва, мм.

Этими же формулами можно пользоваться и для расчета кольцевой кладки шахтных, вращающихся печей, исключая из них член $\alpha/360$.

Кладку купольного свода производят из купольного кирпича, имеющего форму усеченной четырехгранной пирамиды. Ведут ее кольцами с перевязкой вертикальных швов. Толщина швов до 1,5 м. Швы между рядами должны быть направлены строго по радиусу. Одновременно с огнеупорной кладкой купола производят теплоизоляционную кладку из диатомового кирпича на плашку, на том же растворе, на котором выполняют огнеупорную кладку.

Кладку арок выполняют по тем же правилам, что и кладку сводов. Конструкции подвесных сводов приведены на рис. 126.

Устройство проемов в стенах и сводах. Проемы в стенах перекрывают плоскими или цилиндрическими арками (см. стр. 322). Рассмотрим устройство проемов с напуском кирпичей. Напуском кирпичей перекрывают проемы пролетом до 450 мм. Пролеты менее 210 мм перекрывают напуском одного кирпича, проемы с большим пролетом перекрывают напуском двух кирпичей. Длина напуска кирпича не должна превышать половину его длины, т. е. центр тяжести напускаемого кирпича должен находиться над лежащим под ним кирпичом. Иначе напускаемая часть перевесит и кирпич опрокинется. Если перекрытие можно произвести не одним рядом кладки, а несколькими, то в каждом ряду напускают кирпичи до тех пор, пока не перекроется весь проем. Перекрытия проемов в стенах показаны на рис. 127.

Прямоугольные проемы в сводах обрамляют двумя кирпичами, если ширина не превышает 210 мм. Пяты для этих кирпичей вытесывают в кольцах, премыкающих к проему свода. Если ширина проема превышает 210 мм, то его перекрывают арками. Пяты для них затесывают в премыкающих кольцах.

Круглые отверстия в сводах обрамляют кольцевыми арками. Проемы в сводах показаны на рис. 128.

Кладку выстилки и подин начинают по оси симметрии и ведут в обе стороны края. Обычно кладку производят параллельными рядами с перевязкой вертикальных поперечных швов.

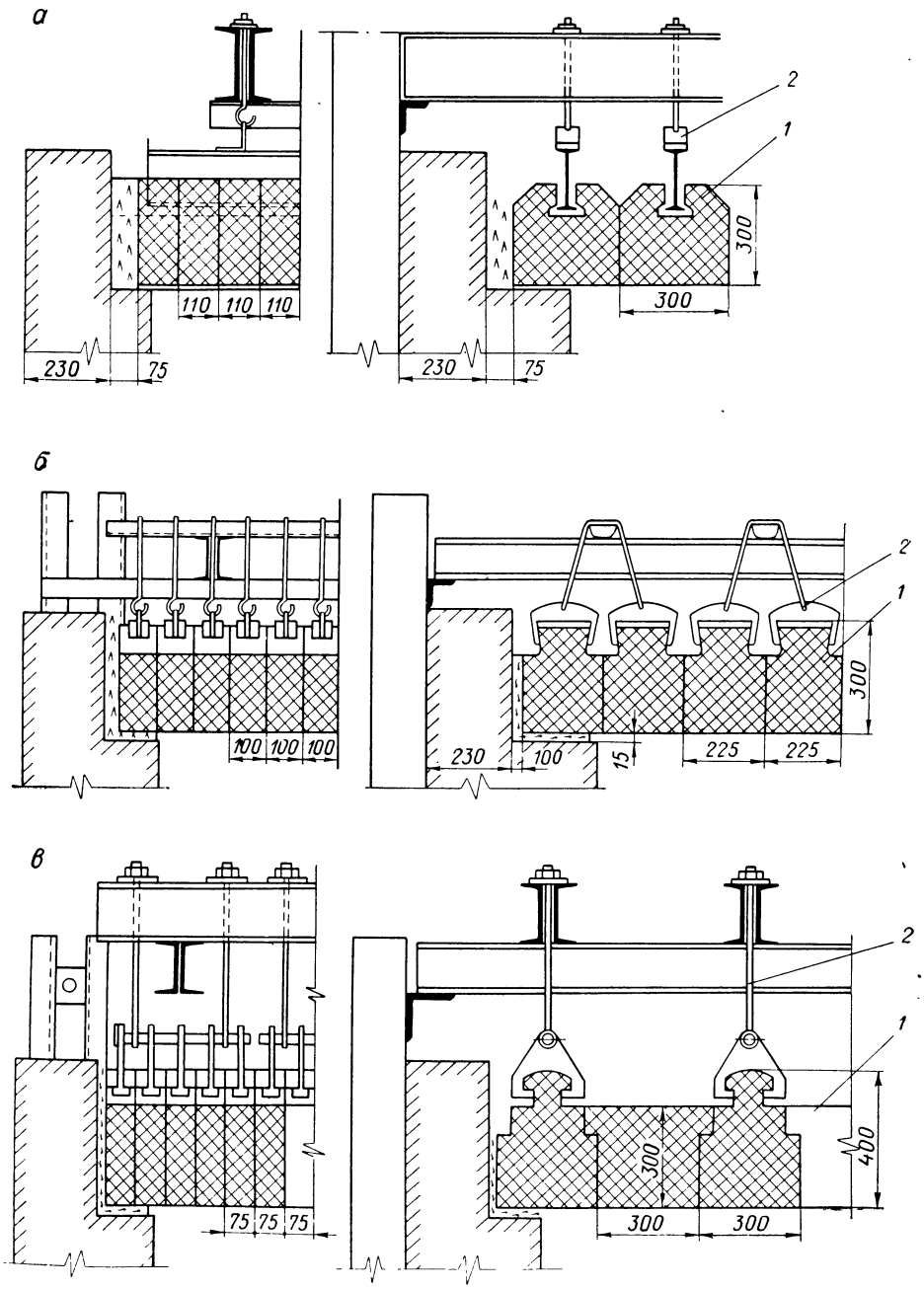


Рис. 126. Подвесные своды:

а — секционным креплением кирпичей; *б* — с индивидуальной подвеской; *в* — комбинированные; *1* — фасонный кирпич; *2* — конструкция подвески.

В рекуперативной насадке для лучшего теплообмена стенки каналов должен обладать высокой теплопроводностью, поэтому кирпичи или фасонные изделия должны обладать и высокой теплоемкостью. Так как через одни каналы рекуператоров постоянно проходят отходящие газы, а через другие — нагреваемый

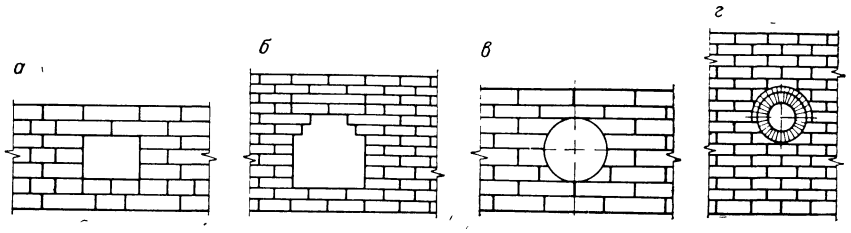


Рис. 127. Перекрытие проемов в стенах:
а — напуском двух кирпичей; *б* — напуском кирпичей из трех рядов; *в* — притеской примыкающих кирпичей к шаброну; *г* — обрамление круглого отверстия арками.

воздух, то каналы должны обладать герметичностью, ибо взаимное смешение газов и воздуха недопустимо. Кладку рекуператоров необходимо вести на таком растворе, который обеспечил бы прочное

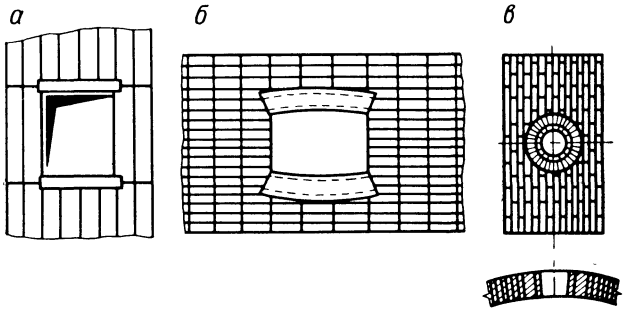


Рис. 128. Проемы в сводах:
а — обрамляемый двумя кирпичами; *б* — обрамляемый двумя арками; *в* — обрамляемый кольцевыми арками.

и плотное, т. е. газонепроницаемое соединение керамических элементов, из которых собирается рекуперативная насадка. Стены должны быть строго вертикальны и параллельны одна другой.

Футеровка цилиндрических дымо- и воздухопроводов. Дымо- и воздухопроводы обычно футеруют в один или два оката толщиной от полкирпича до двух кирпичей. Расчет количества типовых и прямых кирпичей ведут так же как и при кладке сводов и арок, только за центральный угол принимают угол в 360°.

Вид кирпича, укладываемого в окаты, зависит от назначения дымо- и воздухопроводов. Если транспортируется химический агрес-

сивный газ с содержанием серного или сернистого газа (SO_3 и SO_2), то футеруют кислотоупорным кирпичом на кислотоупорном растворе. При транспортировании не агрессивных газов футеровку производят плотным шамотным кирпичом и шамотом-легковесом или диатомовым кирпичом. Между кирпичной футеровкой и кожухом обычно укладывают асбестовый лист.

При производстве футеровочных работ в два оката первоначально выкладывают внизу наружный окат и по нему внутренний. При футеровке верхней части внутренний окат опережает наружный. Поверхность внутреннего оката служит опалубкой для наружного.

Особенности кладки из обыкновенного глиняного и диатомового кирпича. Основное отличие кладки из обыкновенного глиняного и диатомового кирпича от кладки из огнеупорного кирпича состоит в бóльшей толщине швов.

В кладке из обыкновенного глиняного кирпича толщина швов на цементном и сложном растворе задается 8—12 мм, а на растворе из красной глины — 5 мм. Кладку из диатомового кирпича ведут со швом 4—5 мм на огнеупорном растворе и 7—8 мм на цементном — диатомовом. Кладку из диатомового кирпича ведут обычно на том же растворе, на котором возводят одновременно огнеупорную кладку или кладку из обыкновенного глиняного кирпича.

При кладке из обыкновенного глиняного кирпича работают с густым, жестким раствором и следят, чтобы не допускать уменьшения шва в ряду, так как это нарушит горизонтальность рядов кладки.

Авторский надзор за футеровкой печей во время строительства. Проектные организации могут быть привлечены к авторскому надзору за строительством печей по их проектам, если они являются головными образцами, опытно-промышленными конструкциями или если в них применены новые сложные конструктивные решения, технология и материалы.

Представители авторского надзора обязаны наблюдать за соответствием всех элементов печи по утвержденному проекту; наблюдать за производством строительных и монтажных работ: СН и ПШ-Г 12-62. Кладка промышленных печей и труб: СН 156—67. Инструкция по технологии приготовления и применения жаростойких бетонов; СН-П Ш-20-74. Теплоизоляция. Сообщать руководству завода, на котором сооружаются печи, и строительно-монтажным организациям об отступлении от проектов и некачественно выполненных работах; разрешать технические вопросы по проектной документации, возникающие при сооружении печей.

Представители авторского надзора имеют право требовать от строительно-монтажных организаций проведения в своем присутствии выборочных промеров, отбора проб материалов, проведения их анализа, предъявления актов на скрытые работы и испытания при строительстве, сертификатов на примененные материалы и других документов. При отступлении от проекта, неудовлетворительном качестве выполнения работ, материалов или нарушения технологической последовательности производства работ они должны требовать приостановки строительных и монтажных работ.

Существенные отступления от проекта и дефекты выполнения строительно-монтажных работ, а также свои указания и предложения в связи с этим представители авторского надзора фиксируют в журнале, который хранят на строительстве. Согласия на изменения проекта должны быть оформлены письмами с приложением (в случае необходимости) исправленных чертежей. Авторский надзор проводят с начала строительства до ввода печи в эксплуатацию.

Футеровка боровов

Каналы для удаления дымовых газов из печи до дымовой трубы называют боровами. Свод боровов бывает плоский, лучковый 60° и полуциркульный 180°. В зависимости от температуры отходящих дымовых газов и их состава борова выкладывают в зоне до 500 °С

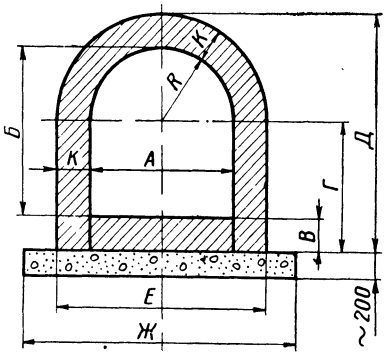


Рис. 129. Боров полуциркульный из глиняного кирпича.

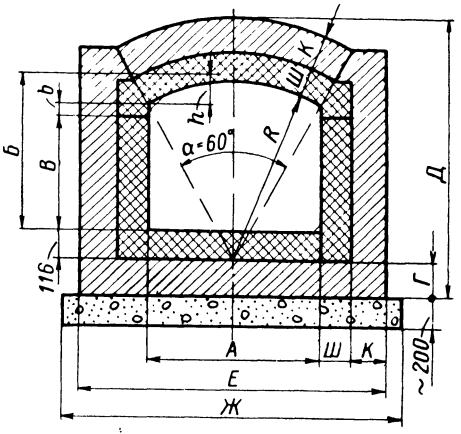


Рис. 130. Боров с лучковым сводом ($\alpha = 60°$).

из глиняного обыкновенного кирпича марки 75 (см. рис. 129 и табл. 52), в зоне выше 500 °С из шамотного кирпича класса В или Б на шамотном растворе с несущей конструкцией из глиняного обыкновенного кирпича. Приведенные на рис. 130 и 131 в табл. 53 и 54

Основные раз

Размеры									Живое сечение борова
А	*Б*	*R*	*В*	*Г*	*Д*	*Е*	*Ж*	*К*	*F*
мм									м²
500	615	250	195	560	1060	1000	1100	250	0,28
625	747	312	195	630	1192	1125	1200	250	0,425
750	880	375	195	700	1325	1250	1350	250	0,599
875	1080	437	195	840	1650	1625	1700	375	0,865
1000	1215	500	195	910	1785	1750	1850	375	1,108
1125	1347	562	195	980	1917	1875	2000	375	1,380
1250	1480	625	195	1050	2050	2000	2100	375	1,678
1375	1615	687	195	1120	2307	2375	2500	500	2,008
1500	1745	750	195	1190	2440	2500	2600	500	2,373
1750	2220	875	265	1610	2985	2750	2850	500	3,550
2000	2515	1000	265	1680	3180	3000	3350	500	4,40
2250	2680	1125	265	1820	3445	3250	3600	500	5,485

основные размеры боровов приняты для среднего и слабого грунтов: характеристика их следующая:

	Средний грунт	Слабый грунт
Расчетное сопротивление, МПа	0,25	0,20
Плотность, кг/м³ . .	1,8	1,9
Угол естественного откоса, градус . .	40	30

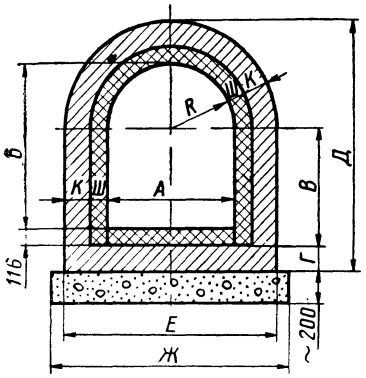


Рис. 131. Боров с полуциркульным сводом.

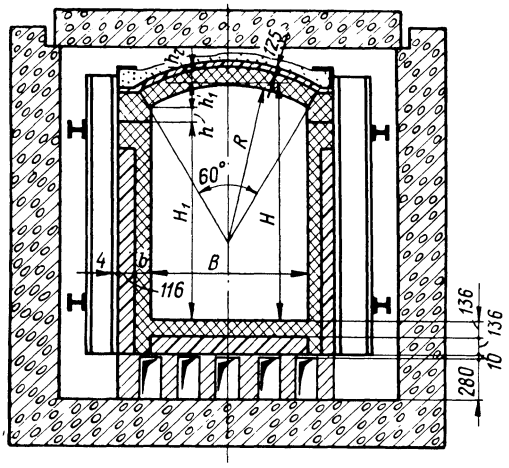


Рис. 132. Боров с железобетонными несущими конструкциями.

Таблица 52

меры боровов с полуциркульным сводом из глиняного обыкновенного кирпича (при нагрузке на пол цеха 2 т/м²)

Периметр борова	Эквивалентный диаметр	Пропускная способность при скорости дыма			Расход кирпича на 1 м		Бетон марки 50
P	$4F/P$	$w=1$ м/с	$w=2$ м/с	$w=3$ м/с	250 × 120 × 65		на фундамент
м		м³/ч			м³	шт.	м³
2,02	0,55	1 010	2 020	3 030	0,674	334	0,22
2,48	0,49	1 530	3 060	4 590	0,78	387	0,24
2,93	0,81	2 150	4 300	6 450	0,895	443	0,27
3,53	0,97	3 110	6 220	3 330	1,55	770	0,34
4,0	1,11	3 990	7 980	11 970	1,69	840	0,37
4,46	1,23	4 970	9 940	14 910	1,835	888	0,40
4,92	1,33	6 040	12 080	18 120	1,99	963	0,42
5,38	1,49	7 230	14 460	21 690	1,86	1389	0,50
5,84	1,62	8 550	17 100	25 650	3,05	1481	0,52
7,19	1,97	12 750	25 500	38 250	3,83	1850	0,57
7,97	2,20	15 850	31 700	47 550	4,17	2016	0,67
8,90	2,46	19 750	39 500	59 250	4,57	2205	0,72

Таблица 53

Основные размеры боровов с лучковым сводом ($\alpha = 60°$) (при нагрузке на пол цеха 2 т/м²)

Размеры											Живое сечение борова	Периметр борова	Эквивалентный диаметр	Пропускная способность при скорости дыма		
А	*Б*	*В*	*Г*	*Д*	*Е*	*Ж*	*Ш*	*К*	*b*	*h*	*F*	*P*	*UF/P*	*w* = =1 м/с	*w* = =2 м/с	*w* = =3 м/с
											м²	м		м³/ч		
464	594	496	70	1146	1196	1300	116	250	37	61	0,2668	2,016	0,529	960	1 920	2 880
580	679	564	70	1231	1312	1400	116	250	37	78	0,3790	2,389	0,635	1364	2 728	4 092
696	830	700	70	1382	1428	1500	116	250	37	94	0,5568	2,898	0,768	2004	4 008	6 012
812	913	768	70	1465	1544	1650	116	250	37	109	0,7074	3,272	0,865	2547	5 094	7 641
328	1065	904	70	1617	1660	1800	116	250	37	125	0,9513	3,791	1,004	3425	6 850	10 275
1044	1186	972	70	1978	2258	2400	232	375	75	140	1,1918	4,231	1,127	4290	8 580	12 870
1160	1338	1108	70	2131	2374	2500	232	375	75	155	1,4942	4,750	1,258	5379	10 758	16 137
1276	1489	1244	70	2282	2490	2650	232	375	75	171	1,8295	5,250	1,394	6586	13 172	19 758
1392	1573	1312	70	2366	2606	2750	232	375	75	187	2,1064	5,619	1,494	7583	15 166	22 749
1508	1724	1468	140	2712	2972	3150	232	500	75	202	2,5023	6,132	1,646	9008	18 016	27 024

Продолжение табл. 53

Расход кирпича на 1 м борова																Бетон марки 50
кирпич глиняный обыкновенный ГОСТ 530—71		кирпич шамотный ГОСТ 8691—73														
прямой		прямой		пятовый				клин ребровый				клин торцовый				
250×120×65		250×120×65		№ 61		№ 52		№ 39 230×113×65×45		№ 38 230×113×65×45		№ 20 230×113×65×45		№ 19 230×113×65×55		на фундамент
м³	шт	м³	шт	м³	шт	м³	шт	м³	шт	м³	шт	м³	шт	м³	шт	м³
0,715	356	0,196	114	0,025	8,7	—	—	0,019	13	0,041	261	—	—	—	—	0,26
0,79	387	0,225	131	0,025	8,7	—	—	0,007	4	0,007	43	—	—	—	—	0,28
0,9	445	0,270	157	0,025	8,7	—	—	—	—	0,032	56	—	—	—	—	0,30
0,97	479	0,313	181	0,025	8,7	—	—	—	—	0,092	56	—	—	—	—	0,33
1,07	532	0,373	217	0,025	8,7	—	—	—	—	0,032	56	—	—	—	—	0,36
1,97	946	0,626	363	—	—	0,104	18	—	—	—	—	0,05	35	0,22	141	0,48
2,13	1019	0,702	407	—	—	0,104	18	—	—	—	—	0,024	17	0,282	181	0,30
2,28	1094	0,779	452	—	—	0,104	18	—	—	—	—	—	—	0,337	216	0,53
2.38	1141	0,853	495	—	—	0,104	18	—	—	—	—	—	—	0,337	216	0,55
3,16	1589	0,97	563	—	—	0,104	18	—	—	—	—	—	—	0,337	216	0,63

Таблица 54

Основные размеры боровов с полуциркульным сводом (при нагрузке на пол цеха 2 т/м²)

Размеры										Живое сечение борова	Периметр	Эквивалентный диаметр
А	*Б*	*R*	*В*	*Г*	*Д*	*Е*	*Ж*	*Ш*	*К*	*F*	*P*	*4F/P*
мм										м²	м	
464	592	232	476	70	1144	1196	1300	116	250	0,252	1,912	0,527
580	718	290	544	70	1270	1312	1400	116	250	0,380	2,347	0,648
696	844	348	612	70	1396	1428	1500	116	250	0,537	2,781	0,772
812	970	406	680	70	1522	1544	1650	116	250	0,717	3,215	0,893
928	1096	464	748	70	1648	1660	1800	116	250	0,926	3,649	1,015
1044	1222	522	816	70	2015	2258	2400	232	375	1,159	4,082	1,133
1160	1348	580	884	70	2141	2374	2500	232	375	1,419	4,517	1,257
1276	1474	638	952	70	2267	2490	2650	232	375	1,706	4.915	1,378
1392	1600	696	1020	70	2393	2606	2750	232	375	2,019	5,385	1,500
1508	1726	754	1088	140	2714	2972	3150	232	500	2,359	5,820	1,621
1740	1978	870	1224	140	2966	3204	3350	232	500	3,116	6,224	2,002
1972	2298	986	1428	140	3286	3436	3600	232	500	4,113	7,692	2,139
2204	2550	1102	1564	140	3538	3668	3900	232	500	5,097	8,560	2,382
2436	2802	1218	1700	140	3790	3900	4150	232	500	6,189	9,429	2,625
2668	3054	1334	1836	140	4042	4132	4400	232	500	7,329	10,297	2.772

Продолжение табл. 54

Пропускная способность при скорости дыма			Расход кирпича на 1 м борова												Бетон марки 50
			кирпич глиняный обыкновенный ГОСТ 530—51		кирпич шамотный ГОСТ 8691—73										
					прямой		клин ребровый				клин торцовый				
$w=1$ м/с	$w=2$ м/с	$w=3$ м/с	250×120×65		230×113×65		№ 39 230×113×65×45		№ 38 230×113×65×55		№ 20 230×113×65×45		№ 19 230×113×65×55		на фундамент
нм³/ч			м³	шт.	м³	шт.	м³	шт.	м³	шт.	м³	шт.	м³	шт.	м³
907	1 814	2 721	0,69	347	0,16	95	0,107	72	—	—	—	—	—	—	0,26
1 370	2 740	4 110	0,79	407	0,19	113	0,105	72	0,014	9	—	—	—	—	0,28
1 933	3 866	5 799	0,87	436	0,22	131	0,093	65	0,055	35	—	—	—	—	0,30
2 581	5 162	7 743	0,96	482	0,25	148	0,080	56	0,081	52	—	—	—	—	0,33
3 334	6 668	9 972	1,04	522	0,28	166	0,050	35	0,125	82	—	—	—	—	0,36
4 172	8 344	12 516	1,88	920	0,50	296	—	—	—	—	0,465	301	—	—	0,48
5 106	10 212	15 318	2,01	984	0,54	319	—	—	—	—	0,452	302	0,055	35	0,50
6 142	12 284	18 426	2,14	1046	0,59	349	—	—	—	—	0,382	267	0,134	86	0,53
7 268	14 536	21 884	2,26	1105	0,64	379	—	—	—	—	0,358	250	0,215	138	0,55
8 492	16 984	25 476	3,44	1679	0,68	403	—	—	—	—	0,333	233	0,268	172	0,63
11 218	22 436	33 654	3,79	1849	0,77	456	—	—	—	—	0,259	181	0,429	275	0,87
14 807	29 614	44 421	4,21	2042	0,89	527	—	—	—	—	0,184	129	0,563	361	0,72
18 349	86 698	55 047	4,57	2227	0,98	579	—	—	—	—	0,136	95	0,700	447	0,79
22 280	14 560	66 840	4,92	2397	1,07	633	—	—	—	—	0,061	43	0,858	550	0,83
26 384	52 768	79 152	5,26	2563	1,19	703	—	—	—	—	—	—	0,981	629	0,88

К средним грунтам можно отнести суглинки и супеси в твердом состоянии с коэффициентом пористости $\varepsilon = 0{,}7$, глины в твердом состоянии с $\varepsilon = 1{,}1$ и суглинки в пластичном состоянии с $\varepsilon = 0{,}8$, а к слабым относятся суглинки в твердом состоянии $\varepsilon = 1{,}0$, супеси в пластичном состоянии с $\varepsilon = 0{,}7$, и глины в пластичном состоянии с $\varepsilon = 0{,}8$.

При значительной нагрузке на пол цеха в месте заложения боровов (до 20 т/м^2) целесообразно применять борова с железобетонными несущими конструкциями (рис. 132). Основные размеры которых приведены в табл. 55.

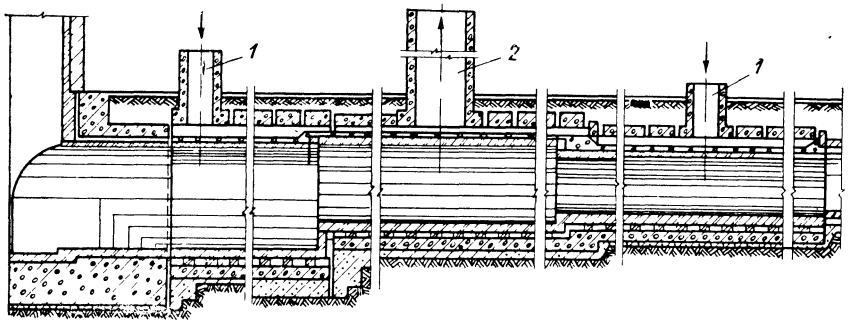


Рис. 133. Устройство вентиляции боровов с несущими железобетонными конструкциями:
1 — проем для насоса воздуха; *2* — вытяжная шахта.

Огнеупорная футеровка боровов этого типа заключена в металлический кожух, между ним и железобетонными конструкциями есть воздушная прослойка, предотвращающая перегрев железобетона.

При проектировании боровов с железобетонными несущими конструкциями необходимо обеспечить интенсивную циркуляцию воздуха в пространстве между кожухом и внутренней поверхностью железобетонной коробки. Для этого предусматривают вытяжные шахты для подвода и отвода воздуха как это показано на рис. 133.

Для осмотра и очистки боровов предусматривают лазы. Конструкция лазов в зависимости от температуры транспортируемых дымовых газов показана на рис. 134. Толщина земляного покрова над подземными боровами должна быть не менее 300 мм.

Для предотвращения разрушения боровов от взрыва при работе на газообразном топливе предусматриваются взрывные клапаны из расчета 250 см^2 поверхности взрывного клапана на 1 м^3 объема борова.

Одна из конструкций взрывного клапана показана на рис. 135. Борова обязательно должны быть защищены от грунтовых и ключевых вод. Наличие воды в борове значительно ухудшает тягу, и поэтому перед пуском печи их необходимо высушить, а это удорожает их эксплуатацию.

Таблица 55

Основные размеры боровов прямоугольного сечения с железобетонными конструкциями

Проходное сечение, м²	Размеры, мм							Количество материалов на 1 м длины борова, м³					Масса металлоконструкций, т
	B	b	H	H_1	h	h_1	h_2	шамотный кирпич, класс В	термоизоляционный диатомовый кирпич	глиняный обыкновенный кирпич	засыпка гранулированным шлаком	уплотняющая обмазка	
2,5	1392	230	1894	1632	75	187	230	1,63	0,82	0,21	0,60	0,06	0,53
3,5	1624		2197	1904		218		1,84	0,95	0,26	0,70	0,06	0,58
4,5	1856		2500	2176		249		2,05	1,07	0,26	0,80	0,07	0,62
5,5	2088		2803	2448		280		2,26	1,20	0,32	0,90	0,08	0,65
6,5	2320		3106	2720		311		2,48	1,32	0,34	1,00	0,08	0,70
8.0	2552		3477	3060		342		2,72	1,46	0,39	1,10	0,09	0,72
10,0	2784	348	3924	3536	15	373	300	4,20	1,65	0,39	1,20	0,10	0,79
12,0	3016		4295	3876		404		4,54	1,79	0,42	1,30	0,11	0,86
15,0	3364		4614	4148		451		4,88	1,95	0,47	1,40	0,12	0,88
18,0	3712		5000	4488		497		5,06	2,12	0,53	1,50	0,13	1,00
21,0	3944		5507	4964		528		5,71	2,29	0,58	1,60	0,14	1,07
25,0	4292		6030	5440		575		6,20	2,51	0,63	1,70	0,15	1,14
30,0	4756		6500	5848		637		6,70	2,71	0,68	1,80	0,17	1,23

Кладка боровов. Перед кладкой боровов по бетонному основанию устраивают выстилку из обыкновенного глиняного кирпича. Поверхность выстилки выкладывают под уровень. Для этого при необходимости применяют подрубку кирпича и заполнение

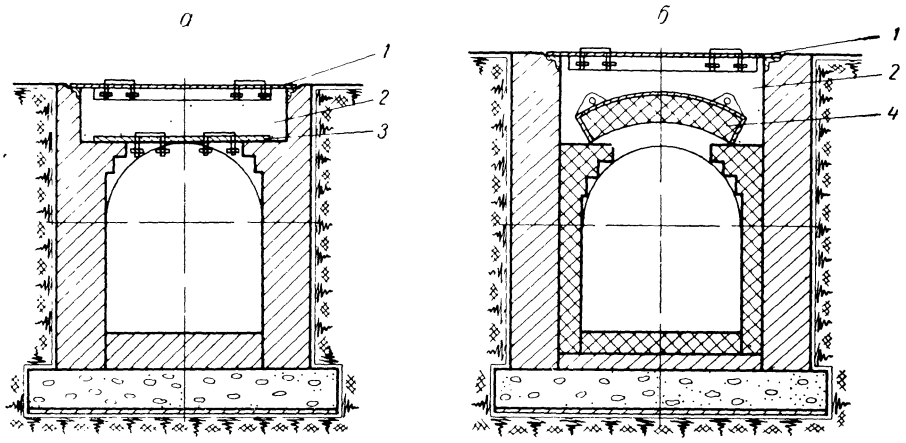


Рис. 134. Конструкция лазов в борова:
а — при температуре дымовых газов до 500 °С; *б* — при температуре дымовых газов выше 500 °С; *1* — плита; *2* — засыпка; *3* — крышка; *4* — подъемный свод.

впадин в бетоне густым раствором. Выстилку выкладывают в перевязку на цементно-глиняном или известково-глиняном растворе с толщиной швов до 10 мм.

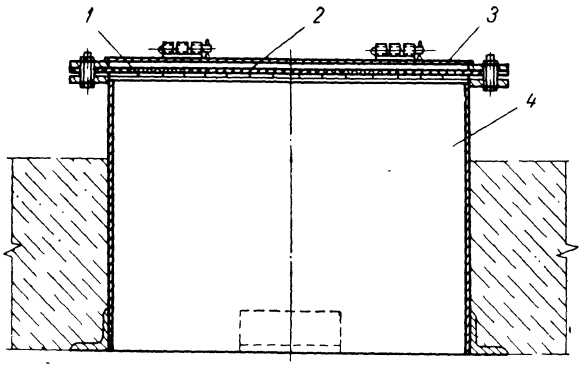


Рис. 135. Клапан взрывной:
1 — металлическая сетка; *2* — асбестовый лист; *3* — крышка; *4* — корпус.

После окончания выстилки из глиняного кирпича приступают к кладке стен из глиняного и шамотного кирпича. Стены из кирпича каждого вида выкладывают отдельно. Зазор между кладкой из красного шамотного и глиняного кирпича заполняют густым раствором. Кладку ведут отдельными участками по длине стены. На каждом

участке сначала выполняют кладку стен с одной стороны, затем с другой. Это создает удобство во время работы, так как устраняется теснота на рабочем месте. Кладку производят по общим правилам с соблюдением заданной толщины швов и с перевязкой их. Шамотный кирпич кладется на густом шамотно-глиняном растворе с осадкой конуса 5—6 см со швом 3 мм. Температурные швы на огнеупорной кладке оставляют через каждые 5 м толщиной 10—15 мм. Верхний ряд стены выполняют под проектную отметку и проверяют с помощью рейки и уровня. Кладку в месте шиберов выполняют после их установки и выверки. Рамы шиберов обкладывают с пристенным швом, заполненным густым раствором.

Расчет сечения боровов. Сечение боровов определяют, задаваясь скоростью потока газов, по следующей формуле:

$$F = V\eta/w$$

где F — сечение борова, см²; V — средний объем дымовых газов, движущихся по борову (с учетом потерь от выбивания или засоса воздуха и отнесенный к среднему расходу топлива), м³; η — расчетный коэффициент форсирования — отношение расхода топлива в пиковую нагрузку к среднему расходу топлива; w — приведенная скорость дымовых газов в борове, м/с.

Средняя скорость движения дымовых газов в боровах принимается в зависимости от температуры 1—3 м/с (нижний предел при температуре дымовых газов 600—800 °С и верхний при 300—400 °С).

Минимальное сечение боровов должно быть 465 × 580 мм, чтобы можно было их чистить, осматривать и ремонтировать.

Фундаменты печей

Статическую нагрузку, слагающуюся из массы металлических деталей, футеровки, перерабатываемого материала и продуктов, воспринимает фундамент печи. Фундаменты выкладывают из бутового камня, бетона и железобетона.

Основные преимущества железобетона в сравнении с другими материалами: возможность укладки фундамента любой формы; хорошая работа железобетона на растяжение при изгибе, что позволяет при малой строительной высоте (без значительного углубления в грунт) получить большую площадь давления фундамента на основание.

Толщина фундамента должна быть такова, чтобы давление от печи передавалось на все основание и в фундаменте не возникло слишком больших изгибающих и скалывающих усилий. К особенностям сооружения печных фундаментов необходимо отнести следующее:

1) на один и тот же фундаментный массив нельзя опирать части печи и других сооружений (борова, дымовую трубу, колонны зданий и т. д.); в этом случае может произойти различная осадка фундамента и могут появиться трещины и перекосы в сооружениях;

2) если конструкция печи располагается ниже уровня грунтовых и ключевых вод, то фундамент строят так, чтобы исключался доступ воды к футеровке путем:

а) устройства вокруг фундаментов глиняных стенок до 300 мм толщиной;

б) гидроизоляция фундамента рубероидом;

в) искусственного снижения горизонта грунтовых вод устройством дренажа с таким расчетом, чтобы уровень воды был на 0,5 м ниже подошвы фундамента;

г) сооружение сварного кессона из мягкой стали (при отсутствии агрессивных вод, что очень существенно на предприятиях химической промышленности);

д) основание фундамента должно быть расположено ниже глубины промерзания грунта (обычно 1,8 м от уровня земли); в отапливаемых или горячих цехах, где нет промерзания грунта, углубление фундамента незначительно;

е) для предотвращения сильного нагревания фундамента от кладки устраиваются воздушные каналы между ними;

ж) в случае заделки стоек каркаса в фундамент, последний должен быть проверен на достаточную прочность от скалывающих усилий.

Обыкновенно давление на грунт даже самой большой печи не превышает 100 кПа, поэтому сооружение фундаментов не представляет больших трудностей. Размеры основания фундамента определяются нагрузкой и допустимым давлением на грунт. Допустимую нагрузку на фундамент рассчитывают по формуле:

$$\sigma = 0{,}25R\sqrt[3]{F/F_1}$$

где σ — допустимое напряжение в нагруженной части фундамента, кПа; R — предел прочности кирпичной кладки при сжатии, кПа; F — полная площадь сечения верхней части фундамента, м^2; F_1 — нагруженная площадь верхней части опоры, м^2.

Если фундамент заложен на меньшую, чем требуется глубину, он может опуститься, выпирая прилегающие слои грунта. Глубину заложения фундамента, при которой исключена возможность выпирания грунта, можно рассчитать по формуле:

$$h = H\,\mathrm{tg}^4(45 - \varphi/2) - b\,\frac{1 - \mathrm{tg}^4(45 - \varphi/2)}{2\mathrm{tg}(45 - \varphi/2)}$$

где h — глубина заложения, м; H — высота столба грунта, м; ее определяют по формуле: $H = P/F\nu$; P — давление фундамента, Па; F — площадь фундамента, м^2; ν — объемная масса грунта, кг/м^3; φ — угол естественного откоса, градусы; b — ширина фундамента, м.

Фундаменты печей рассчитывают и на динамическую нагрузку, возникающую при загрузке печей, вращения корпуса, деталей ее и перемещения шихты.

Металлы

В строительстве печей металлы применяют в виде прокатной стали: лист, балки, швеллера, уголки, полосы, трубы круглого сечения, сталь в виде разного рода поковок, изготовляемых кузнечным способом, и металлические изделия (метизы), а также чугунные и стальные отливки.

	Химический		
	углерод	кремний	марганец
Кремнистый чугун с шаровидным графитом ЖЧСШ 5,5—0,1	2,4—3,0	5,0—6,0	0,7
Никель меднохромистый чугун ЖЧНДХ—15—7—2	2,5—3,0	1,5—3,0	0,5—1,2
Сталь Х25ТЛ	0,2	0,7	0,6
Сталь 1Х18Н9ТЛ	0,14	1,0	1,0—2,0
Сталь Х9С2Л	0,35—0,5	2,0—3,0	0,7
Сталь Х24Н12СЛ	0,4	0,5—1,5	0,3—0,8
Сталь Х18Н24С2Л	0,3—0,4	2,0—3,0	1,5
Сталь Х25Н2Л	0,4—0,6	1,0—2,0	0,4—0,7
Сталь Х25Н12Л	0,4—0,6	1,0—1,5	0,2—0,5
Хромистый чугун ЖЧХ—09	2,8—3,4	1,5—2,5	1,0
Хромистый чугун ЖЧХ—1,5	2,8—3,4	1,7—2,7	1,0
Хромистый чугун ЖЧХ—2,5	3,0—3,5	2,8—3,8	1,0

В зонах, подвергающихся воздействию высоких температур, применяют специальные жаростойкие и жароупорные сорта чугуна и стали.

Химический состав и область применения жароупорных сплавов приведены в табл. 56.

Кожухи печей

Для создания герметичности и прочности печи, футерованные огнеупорным материалом, почти всегда имеют металлический кожух. Если назначение кожуха — только герметизация стенок печи от выхода газов, то достаточно тонкостенного кожуха из листового материала, имеющего усиления в тех местах, где воспринимаются

Таблица 56

Жароупорные сплавы для деталей печей

состав, %			Применение
хром	никель	прочие элементы	
0—0,2	—	Mg 0,08	Для шиберов, колосников и других печных деталей, работающих при 950—1000 °С
1,5—2,5	14—17	Cu 6÷8,5	То же до 850 °С
23—27	0,6	Ti 0,4÷0,8	Для печной арматуры
17—20	8—11	Ti 0,8	Для деталей печной арматуры, нагреваемых до 900 °С
8—10	0,6	—	Для печной арматуры, нагреваемой до 700 °С
22—26	11—13	—	Для деталей, работающих при высоких температурах и давлениях
17—20	23—25	—	Для деталей печей, работающих при высоких температурах и нагрузках (печные конвейеры, подовой болт и т. д.)
24—27	1,5—2,0	—	Для деталей, работающих при температурах до 1100 °С и испытывающих ударную нагрузку
24—27	12—13	—	То же
0,7—1,1	—	—	Для шиберов, колосников и других печных деталей, работающих при температуре до 600 °С
1,2—1,9	—	S 0,12	То же до 650 °С
2,0—2,7	—	—	То же до 700 °С

сповые нагрузки от футеровки. Но если будут дополнительные нагрузки на кожух печи, то его необходимо выполнять несущим. Даже самые высокие давления газов не должны сильно деформировать кожуха печей.

Во вращающихся печах возникают усилия от смещения материалов, которые также воспринимаются кожухом печи; во избежание повреждения футеровки кожух не должен деформироваться ни от воздействия этих усилий, ни от тепловых нагрузок.

Цилиндрические печи имеют крепление, состоящее из сплошного металлического кожуха, усиленного кольцевыми поясами, располагающимися на расстоянии нескольких метров один от другого. Для горизонтальных вращающихся печей часть этих поясов

совмещается с опорами, на которых стоит и вращается корпус печи.

Неподвижные трубчатые печи должны также иметь кожух из толстого листового материала, так как при деформации кожуха футеровка легко растрескивается.

В вертикальных цилиндрических печах больших диаметров, в которых свод выполняется с незначительным превышением верхней кромки, при необходимости кольцевая кладка выполняется из парового кирпича; на них устанавливаются стяжные обручи, с помощью последних можно регулировать высоту плоских сводов.

Дополнительными конструктивными элементами кожухов печей являются кроме того, рамы лазов и дверей, взрывные клапаны, измерительные патрубки, опорные уголки для нагрузок от футеровки печей (свода, температурные швы), ограждения и т. д.

Защита кожухов печей. Футеровка печей не является для газов герметичной, кирпичи и температурные швы имеют поры и тепловые расширения между отдельными слоями материала стенки печи вызывают при нагревании и охлаждении печи разрыхление кладки стенок. Вследствие этого газы и пары проходят через кладку к кожуху. Так как в стенке печи образуется температурный перепад, то проникшие к кожуху газы могут охладиться настолько сильно, что будут конденсироваться. Агрессивный конденсат попадает на кожух, который начинает корродировать.

Практика эксплуатации печей показывает, что при использовании в качестве топлива мазута, содержащего от 1 до 6 г серы на 1 л, через короткое время коррозия будет значительно большей, чем при использовании мазута, содержащего серу в меньших количествах. Остатки жидкого топлива могут содержать вещества, которые ведут к образованию SO_3 из SO_2. SO_3 вызывает значительно более сильную коррозию, чем SO_2, так как с конденсированным водяным паром образует серную кислоту. Контакт SO_2 с глиноземом и щелочами при повышенной температуре также способствует образованию SO_3 и серной кислоты. В результате стальные листы полностью разрушаются в течение нескольких недель. Во избежание коррозии кожуха печи между огнеупорной футеровкой и кожухом прокладывают изоляционный слой из кварцитовых плиток; эффективную изоляцию от пара и жидкости между кожухом и футеровкой создают также пластины из кварцевого пеностекла, укладываемые в жидкое стекло.

Если ожидается коррозия от серусодержащих газов, то незащищенная стенка из листового металла не должна охлаждаться ниже 180 °С, так как ниже этой температуры металл начинает корродировать. При ожидании образования SO_3 и возможности повышения концентрации H_2SO_4 вследствие испарения воды температуру металлической стенки печи требуется поддерживать не ниже 250 °С. Для обеспечения указанной температуры кожух изолируют снаружи асбестовым листом. Толщина изоляции должна быть такой, чтобы температура кожуха не была выше 450 °С, так как образуется FeS_2, быстро разрушающее кожух печи. Кроме того, при очень толстой изоляции кожух вследствие его теплового расширения отходит

от футеровки и образуется промежуточное пространство, через которое идут горячие блуждающие раскаленные газы; последние могут нагреть кожух докрасна, вызвав повреждение печи. Применение теплоизоляционных асбестовых листов, создающих герметичность между кожухом и футеровкой, может создать препятствия для таких блуждающих газов. Пустоты, образовавшиеся вследствие сильного отхода кожуха от футеровки, можно заполнить впрессованием жидкого стекла через штуцера в стенке кожуха. Сплошные кожуха печей сваривают из стальных листов толщиной от 4 до 30 мм; они сами по себе обеспечивают достаточную прочность и жесткость конструкции печей.

Некоторые печи не имеют наружных металлических кожухов и крепление их ограничивается металлическими поясами и каркасом, охватывающими непосредственно футеровку.

Каркасы

Металлический каркас предназначается для обвязки кожуха печи или футеровки, для создания прочности, для крепления гарнитуры печи (заслонки окон, механизмов печи, горелки, форсунки и т. д.), а также для противостояния температурным расширениям кладки и направления их в сторону температурных швов.

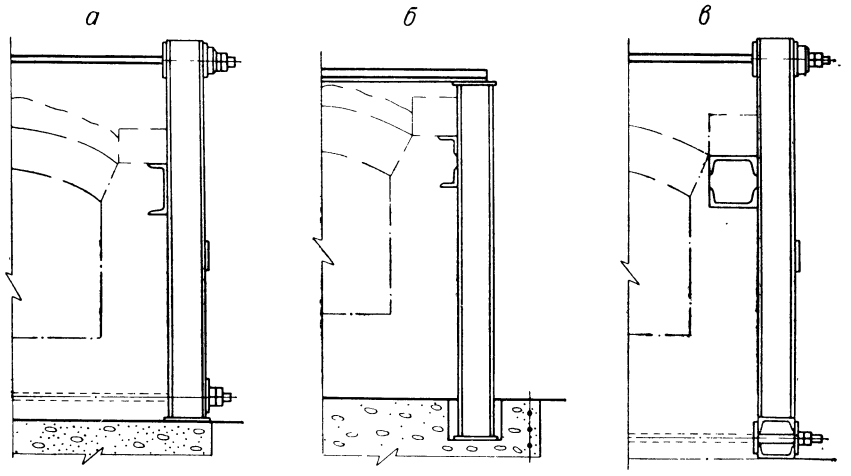


Рис. 136. Каркасы печей:
а — установка стойки на фундаменте печи; *б* — то же с засыпкой нижнего ее конца в фундамент; *в* — установка стойки на швеллерах.

По конструкции каркасы подразделяют на жесткие и подвижные (рис. 136). Жесткий каркас представляет собой монолитное строительное сооружение. Подвижный каркас благодаря отпуску связей дает возможность расширению кладки при нагревании. Однако в настоящее время подвижный каркас печи почти не применяют потому, что отпуск связи практически невозможно выполнить в точном соответствии с температурным расширением кладки. Под

действием собственной массы и высокой температуры свод дает распор. Точно рассчитать силу распора трудно, так как приходится учитывать расширение кладки свода под влиянием температуры. Приближенная сила распора может быть определена, согласно схеме (рис. 137), по формуле:

$$R = k\frac{P}{2}\operatorname{ctg}\alpha/2$$

где R — распор свода, Н; k — коэффициент увеличения силы R в зависимости от температуры; P — сила тяжести свода по длине между стойками, Н; α — центральный угол свода.

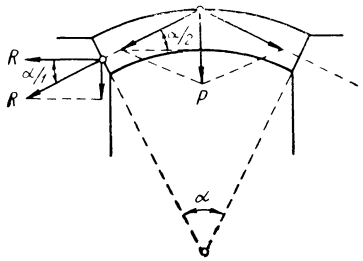


Рис. 137. Схема сил распора футеровки.

Сила распора увеличивается с повышением температуры печи. Значение коэффициента k в зависимости от температуры свода:

До 900 °С	2
» 1000 °С	2,5
» 1300 °С	3,0
» 1500 °С	3.5

Элементы стального каркаса рассчитывают по допускаемому напряжению на разрыв, не превышающему $\sigma = 11{,}75$ кН/см^2. При установке печи в сейсмичных районах страны увеличивают прочность каркаса на сейсмичность.

Расчет каркаса. Пятовые балки, стойки и верхние связи определяют расчетом. Момент сопротивления пятовой балки рассчитывают по формуле

$$W_{\text{п. б}} = Pl/8\sigma$$

где $W_{\text{п. б}}$ — момент сопротивления пятовой балки, см^3; l — расстояние между стойками каркаса, см.

Конструкцию пятовой балки выбирают по рис. 138 и определяют номер профиля по найденному моменту сопротивления.

Момент сопротивления боковой стойки определяют по формуле:

$$W_{\text{ст}} = \frac{h_1 + h_2 R}{(h_1 + h_2)\sigma}$$

где $W_{\text{ст}}$ — момент сопротивления боковой стойки, см^3; h_1 — расстояние от нижней связи до пяты, см; h_2 — расстояние от пяты свода до верхней связи, см.

По найденному моменту сопротивления находят номер профиля.

Для боковых профилей стоек, изображенных на рис. 136, даны три типа решений:

а) установка стойки на фундаменте печи;

б) то же с заделкой нижнего ее конца в фундамент и местной армировкой края фундамента;

в) установка стойки с нижней балкой.

Сечение верхней связи рассчитывают по формуле:

$$\omega = \frac{Rh_1}{(h_1 + h_2)\sigma}$$

В качестве связи для жесткого каркаса выбирают угольник или полосу; для подвижного — можно взять круглую. Продольные связи должны быть проложены над сводом также высоко, как и поперечные. В длинных печах во избежание изгиба продольных связей рекомендуется прокладывать их над поперечными.

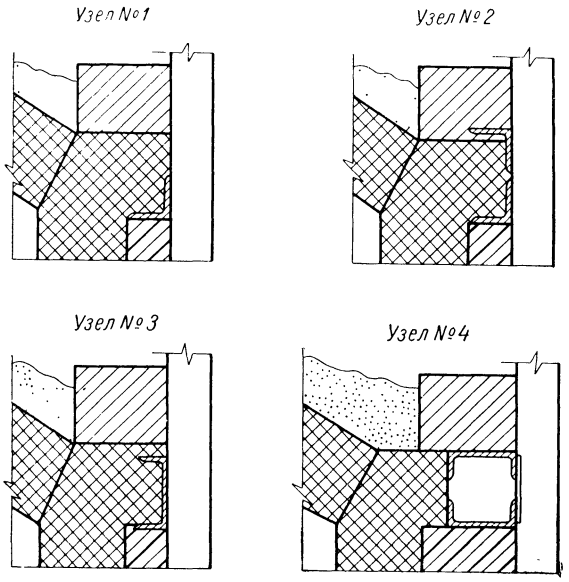


Рис. 138. Конструкции пятовых балок.

Сжигательные устройства

Классификация. В печи химических производств для проведения эндотермических реакций необходимо подводить тепло, получающееся от сжигания топлива или отходящих печных газов (содержащих в основном CO) от руднотермических фосфорных, карбидных и ретортных печей.

В печи, где протекают экзотермические окислительные реакции, необходимо подводить и распыливать вещества в жидкой или газовой фазе. Предварительную подготовку газовоздушной смеси, а также распыливание жидких материалов производят в специальных сжигательных устройствах. В большинстве сжигательных устройств только приготавливают газовоздушную смесь или распыливают жидкий материал, а горение осуществляют вне его. В зависимости от сжигаемого материала сжигательные устройства можно разделить на следующие группы: а) горелки газовые; б) форсунки для мазута; в) форсунки для серы; г) форсунки для фосфора; д) форсунки для сырья.

Выбор типа и количества сжигательных устройств, их размещение, организация процесса горения, движение продуктов горения являются основными и наиболее ответственными задачами, которые необходимо решать при проектировании печей и других огневых

установок. В зависимости от решения этих вопросов определяют тепловые и аэродинамические режимы, степень интенсивности проведения технологического процесса и экономичность установки.

Горелки газовые (смесеобразователи). Горелки предназначены для приготовления горючей газовой смеси и подачи ее к месту горения. Горения горючей газовой смеси в горелках не происходит.

Газообразное топливо с теплотехнической точки зрения является наиболее совершенным горючим, так как его удобно подводить к печам, сжечь непосредственно в рабочем пространстве и получить необходимую температуру и атмосферу печи. Сжигание газа позволяет создавать факел необходимой длины для наилучшего проведения технологического процесса и получить характер горения, обеспечивающий наивысший к. п. д. печи. Газообразное топливо позволяет полностью автоматизировать регулирование температуры в печи и контролировать его горение.

Недостатки применения газового топлива — взрывоопасность, токсичность, зависящая от содержания CO. В основном в качестве газообразного топлива используют природный газ, газы нефтепереработки, печные газы, водород, сжиженные и др.

Для сжигания газа в печах и на других огневых установках применяют разнообразные типы и конструкции горелок, выбор которых определяется свойствами газов, размерами печей и установок, характером технологических процессов и др.

В настоящее время в эксплуатации находится большое количество газовых горелок различных конструкций, объединенных в небольшие группы, которые характеризуются общими признаками. Различие горелок в этих группах заключается главным образом в конструктивном решении способа их изготовления и степени сложности, условиями эксплуатации, а не особенностями процесса горения газа и показателями процесса горения.

Классификация газовых горелок. 1. В зависимости от области применения газовые горелки подразделяют на два основных типа:

а) газовые смесеобразователи общего назначения, когда их можно устанавливать на большинстве печей, топок и других огневых установках;

б) горелки специального назначения, когда их устанавливают только в определенной конструкции печи или огневой установки и практически исключается установка их на других конструкциях.

2. В зависимости от теплотворности сжигаемого газообразного продукта горелки можно подразделить на следующие типы:

а) для сжигания газов низкой теплотворности ($Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 8$ МДж/м^3);

б) для сжигания газов средней теплотворности ($Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 8$—20 МДж/м^3);

в) для сжигания газов высокой теплотворности ($Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 20$ МДж/м^3).

3. По способу подвода воздуха, необходимого на горение, горелки можно подразделить на следующие типы:

а) диффузионные, когда воздух притекает к пламени из окружающей атмосферы;

б) инжекционные, когда воздух засасывается в горелку;

в) дутьевые, когда воздух в горелку нагнетается.

4. В зависимости от давления газы, поступающие в горелку, можно подразделять на следующие типы:

а) низкого давления (до 0,005 МПа);

б) среднего давления (от 0,005 до 0,3 МПа);

в) высокого давления (выше 0,3 МПа).

5. Газовые горелки могут быть комбинированными, если в них предусмотрена возможность сжигания дополнительного вида топлива.

Автором выбран ряд горелок различных типов, рекомендуемых для установки на печах химической промышленности, топках и других огневых установках. Описаны конструкции этих горелок и их эксплуатационные особенности.

Горелки газовые общего назначения. *Инжекционные горелки среднего давления* являются горелками с полным предварительным смешением газа с воздухом, что позволяет осуществить полное интенсивное сжигание газа с коэффициентом расхода воздуха, близким к единице. Эти горелки просты в изготовлении и эксплуатации.

Диапазон производительности горелок, разработанных различными проектными институтами, примерно один и тот же. Однако по конструкции и размерам отдельных деталей инжекционные горелки отличаются друг от друга, поскольку расчет производится не по единой общепринятой методике, а с различными допущениями. Некоторые исходные данные (теплота сгорания газа, плотность) также различаются.

Здесь рассмотрены инжекционные горелки конструкции Теплопроекта ГИП (рис. 139 и 140).

Смеситель *1* горелки выполняется в виде нормального инжектора с центральным соплом, через которое газ подается с большей скоростью. Воздух засасывается струей из окружающей атмосферы. Для нормальной работы таких горелок необходимо, чтобы давление природного газа перед соплом составляло 50—100 кПа.

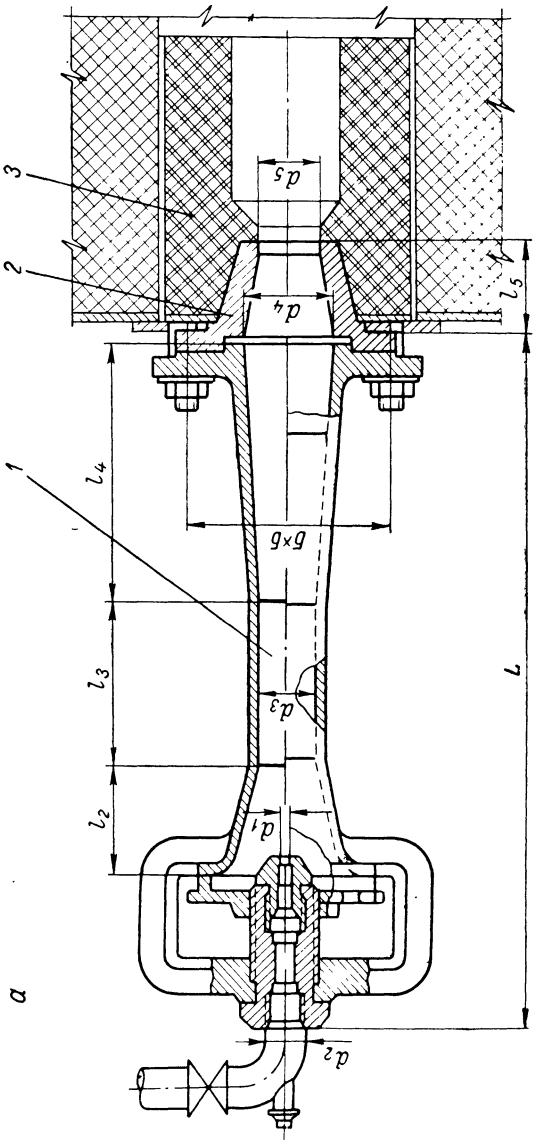
Эти горелки рассчитаны на сжигание природного газа с теплотой сгорания $Q_н^р = 35{,}6$ МДж/м³ при коэффициенте расхода воздуха $\alpha = 1{,}05$ и противодавлении в топочном объеме 10 Па при плотности газа 0,73 кг/м³. Диапазон регулирования производительности горелок равен 1 : 3. При расчетном давлении газа 100 кПа горелки (девять номеров) могут работать в диапазоне нагрузок 4—140 м³/ч.

Горелки ГИП-7 — ГИП-9 от горелок ГИП-1 — ГИП-6 отличаются тем, что у них головки охлаждаются.

Зависимость расхода природного газа от его давления перед горелкой показана на рис. 141.

Техническая характеристика и конструктивные размеры горелки приведены в табл. 57.

Горелки могут быть использованы и для сжигания высококалорийных газов с различной теплотой сгорания, но тогда необходимо


3
2
1
d_5
d_4
l_5
l_4
$b \times b$
l_3
d_3
l_2
d_1
d_2
L
a

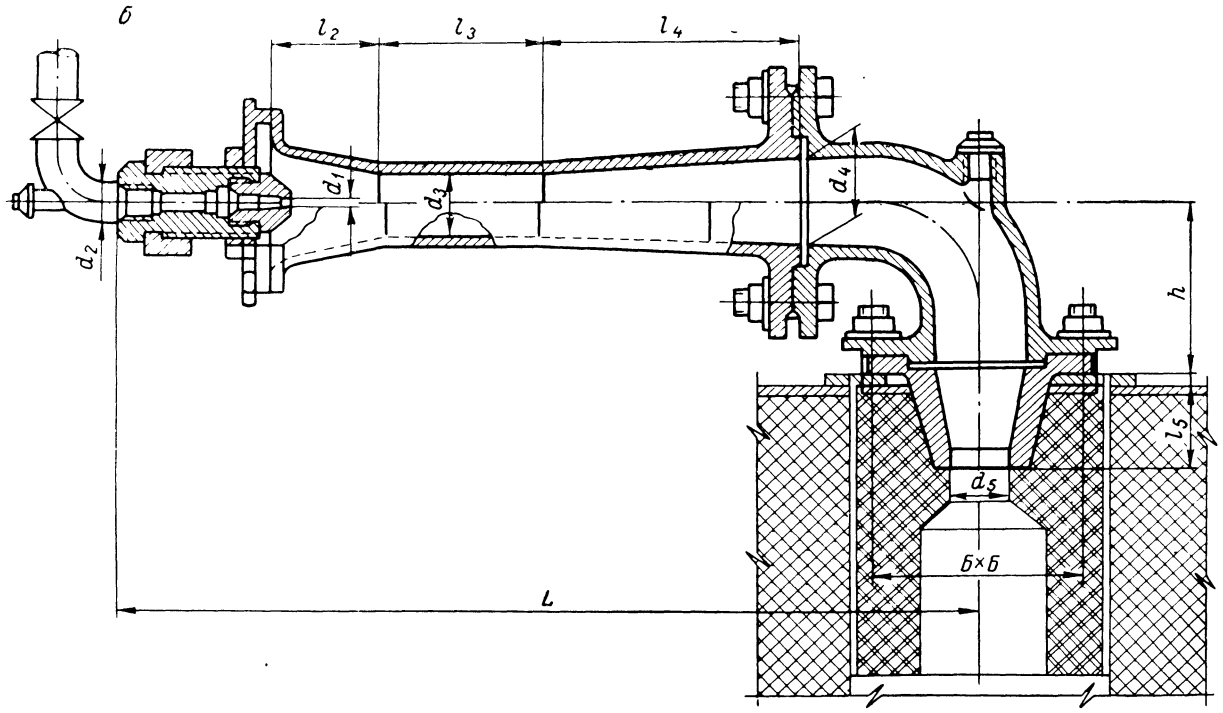
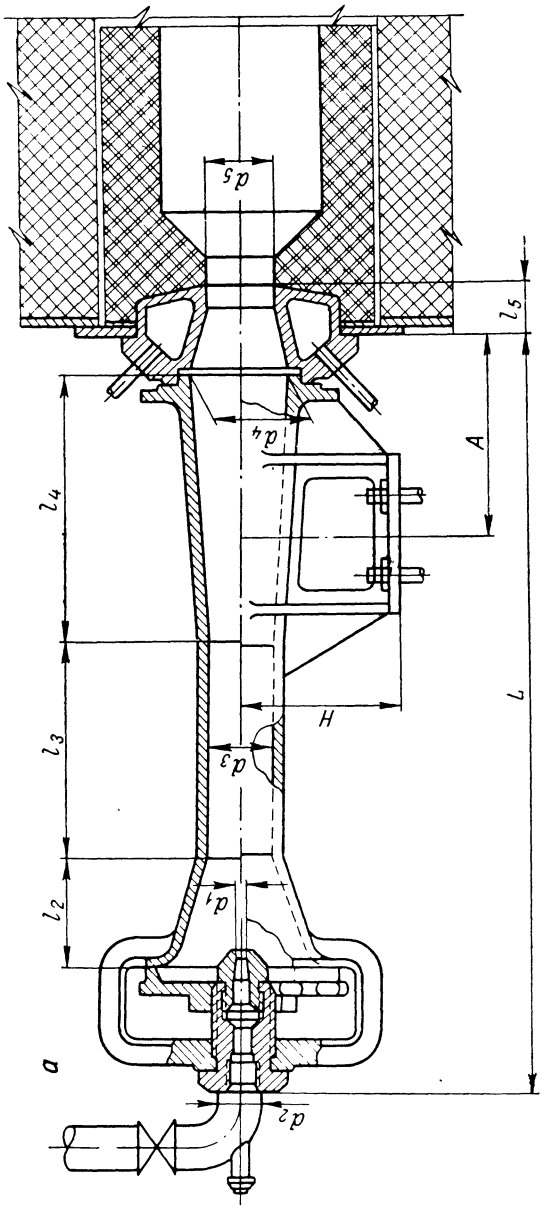


Рис. 139. Горелки инжекционные среднего давления конструкции Теплопроекта типа ГИП-1 — ГИП-6 для природного газа:

а — прямая; *б* — угловая; *1* — смеситель; *2* — носик горелки; *3* — горелочный камень.


d_5
l_5
A
d_4
l_4
H
L
l_3
d_3
l_2
d_1
a
d_2

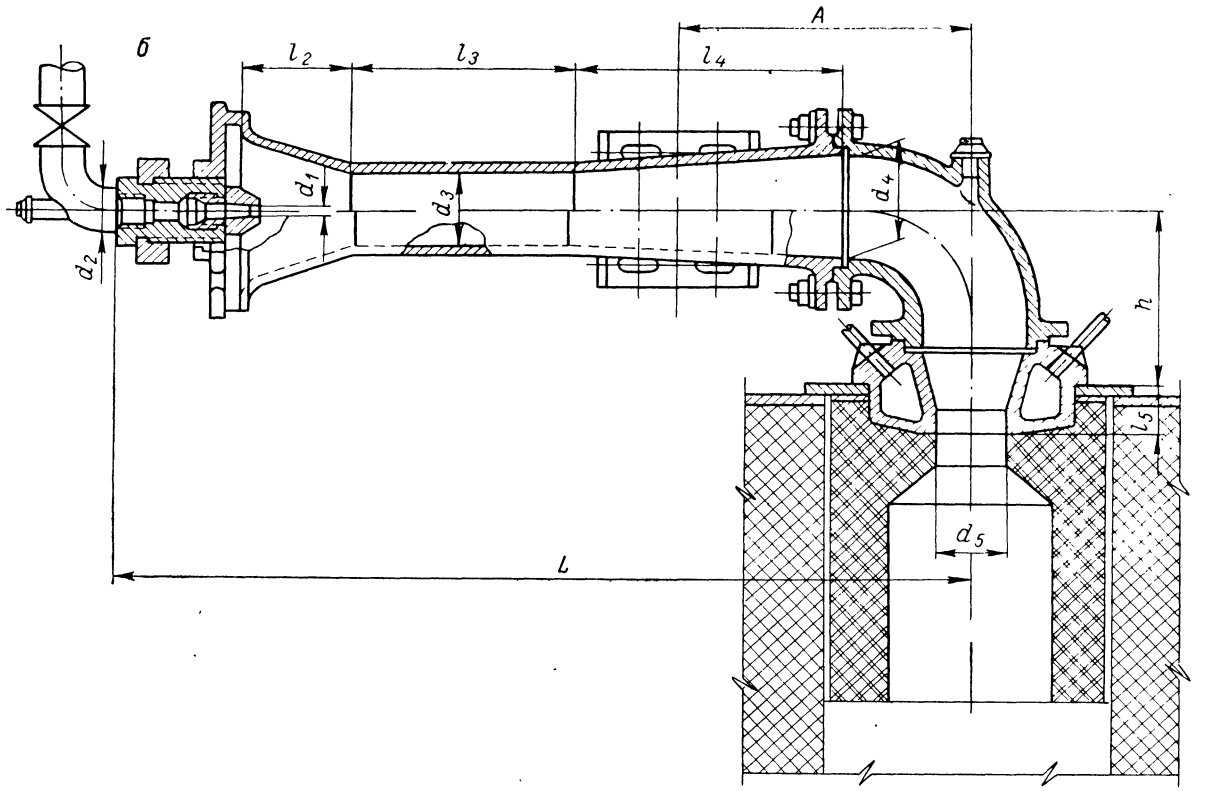


Рис. 140. Горелки инжекционные среднего давления конструкции Теплопроекта типа ГИП-7 — ГИП-9 для природного газа:

а — прямые; *б* — угловые.

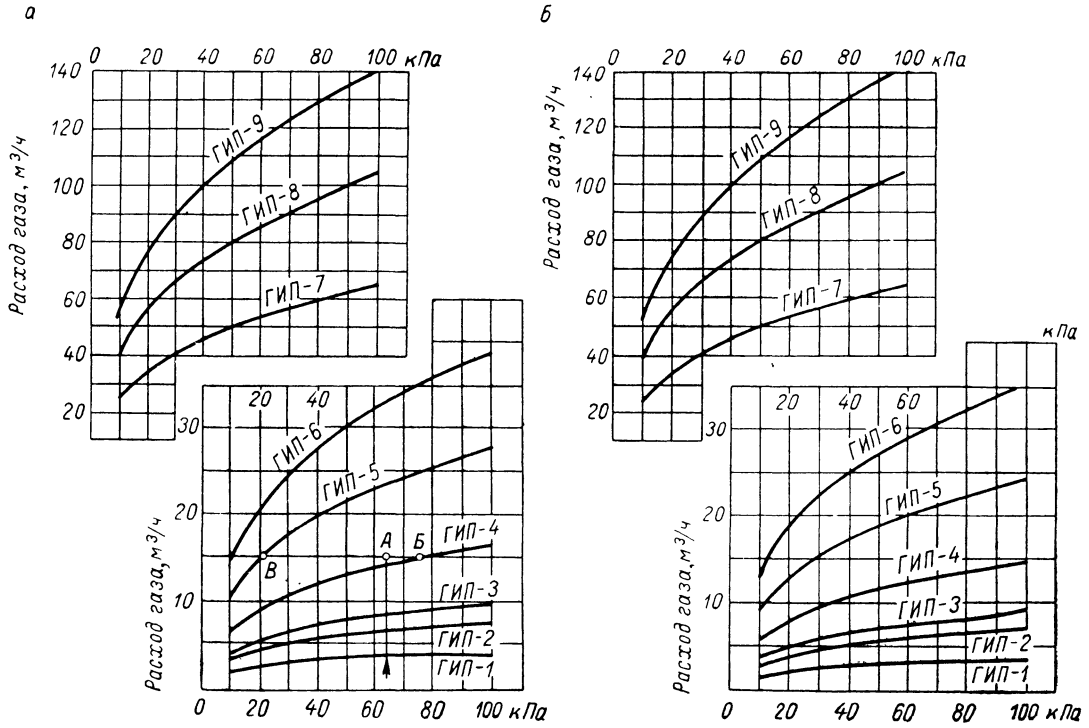


Рис. 141. Зависимость расхода природного газа от его давления перед горелкой.

Таблица 57

Характеристики и основные конструктивные размеры инжекционных горелок среднего давления ГИП конструкции Теплопроекта

Расход газа $V_г$, м³/ч, при давлении $P_г$, кПа						Горелка	Размеры, мм (дюймы)											Размеры горелок, мм			Масса горелки, кг
10	20	30	50	84	100		d_2	d_1	d_3	d_4	d_5	l_2	l_3	l_4	l_5	h	L	A	H	$Б \times Б$	
1,6	2,2	2,7	3,3	3,9	4,2	ГИП-1, тип I	(1/2)	1,9	27	41	30	40	82	108	40	—	299	—	—	90×90	5,0
1,4	2,0	2,4	2,9	3,6	3,8	ГИП-1, тип II	(1/2)	1,8	27	41	30	40	82	108	40	100	375	—	—	90×90	8,0
2,9	4,1	5	6,1	7,3	7,9	ГИП-2, тип I	(3/4)	2,6	36	54	40	55	108	144	48	—	399	—	—	120×120	10,6
2,7	3,9	4,7	5,6	6,8	7,4	ГИП-2, тип II	(3/4)	2,5	36	54	40	55	108	144	48	120	490	—	—	120×120	17,0
3,6	5,1	6,2	7,6	9,1	9,8	ГИП-3, тип I	(3/4)	2,9	41	62	45	65	123	163	48	—	445	—	—	130×130	12,0
3,4	4,7	5,9	7,0	8,6	9,2	ГИП-3, тип II	(3/4)	2,8	41	62	45	65	123	163	48	120	552	—	—	130×130	20,0
6,2	8,8	10,7	13	15,6	16,8	ГИП-4, тип I	(1)	3,8	53	80	58	80	159	212	63	—	562	—	—	145×145	18,2
5,6	7,9	9,7	11,5	14,0	15,1	ГИП-4, тип II	(1)	3,6	53	80	58	80	159	212	63	140	680	—	—	145×145	29,2
10,2	14,6	17,8	21,6	26	28	ГИП-5, тип I	(1¼)	4,9	68	102	75	105	202	272	73	—	701	—	—	170×170	26,0
9,1	12,8	15,7	18,8	22,8	24,6	ГИП-5, тип II	(1¼)	4,6	68	102	75	105	202	272	73	160	839	—	—	170×170	40,0
14,3	20,3	24,9	30,2	36,3	39,1	ГИП-6, тип I	(1½)	5,8	80	120	88	121	240	320	83	—	839	208	175	180×180	51,4
12,9	18,4	22,4	27	32,7	35,2	ГИП-6, тип II	(1½)	5,5	80	120	88	121	240	320	83	200	1004	373	175	180×180	69,0
24	34	41,6	50,2	60,8	65,4	ГИП-7, тип I	(2)	7,5	106	159	117	150	318	424	70	—	1125	290	210	—	97
24	34	41,6	50,2	60,8	65,4	ГИП-7, тип II	(2)	7,5	106	159	117	150	318	424	70	270	1265	430	210	—	122
38,5	54,5	66,5	80,3	97,1	104,6	ГИП-8, тип I	(2)	9,5	131	197	144	200	395	524	90	—	1388	330	250	—	154
38,5	54,5	65,5	80,3	97,1	104,6	ГИП-8, тип II	(2)	9,5	131	197	144	200	395	524	90	300	1523	485	250	—	190
51,7	73,8	89,4	108,6	131	140,8	ГИП-9, тип I	(2½)	11,0	156	234	171	240	470	624	120	—	1593	420	250	—	197
51,7	73,8	89,4	108,6	131	140,8	ГИП-9, тип II	(2½)	11,0	156	234	171	240	470	624	120	330	1783	610	250	—	241

подобрать диаметр сопла. Для сохранения расчетной теплопроизводительности горелки расход газа определяют по формуле:

$$V'_г = V_г \frac{Q^р_н}{Q'^р_н}$$

где $V'_г$ — искомый расход газа, м³/ч; $V_г$ — расход природного газа, соответствующий горелке заданной теплопроизводительности, м³/ч.

Необходимое давление газа определяют по формуле *:

$$P'_г = P_г \frac{\rho'_{о.г}}{\rho_{о.г}} \left(\frac{V'_г}{V_г}\right)^2 = P_г \frac{\rho'_{о.г}}{\rho_{о.г}} \left(\frac{Q^р_н}{Q'^р_н}\right)^2$$

где $P'_г$ — искомое давление газа, Па; $P_г$ — давление природного газа, Па; $\rho'_{о.г}$ — плотность применяемого газа, кг/м³; $\rho_{о.г}$ — плотность природного газа, кг/м³; $Q^р_н$ — теплота сгорания природного газа, кДж/м³; $Q'^р_{нi}$ — теплота сгорания применяемого газа, кДж/м³.

Для низкотемпературных рекомендуется устанавливать нормальные туннели: для высокотемпературных — укороченные.

Горелочные камни следует изготовлять из высокоглиноземистого шамота, каолина (по ТУ-112) или термостойкого хромомагнезита (по ЧМТУ 5128—59). Если горелочного камня нет, туннель может быть выполнен из набивной массы следующего состава: 45% порошка хромистого железняка; 45% порошка обожженного магнезита и 10% огнеупорной глины.

Толщина набивной массы должна быть не менее 20—25 мм.

С понижением теплоты сгорания газа и при необходимости неизменной теплопроизводительности горелки давление его должно быть повышено. При несоблюдении этого теплопроизводительность горелки снизится. Для сохранения теплопроизводительности и коэффициента расхода воздуха неизменными необходимо пересчитать диаметр сопла по формуле (нормаль Теплопроекта):

$$d'_1 = d_1 \sqrt{\frac{A'}{m^2\delta_0 + 1{,}27\,(\delta_0 + 1)\,m + 1{,}27}}$$

где d_1 — диаметр сопла горелки природного газа, мм; d'_1 — искомый диаметр сопла горелки, мм; A' — коэффициент: для горелок типа I-196 и для горелок типа II-213; m — объемная кратность инжекции (отношение объема воздуха к объему газа); δ_0 — отношение плотности воздуха к плотности применяемого газа.

Наиболее ценным свойством горелок внутреннего смешения, образующих смесь по принципу инжекции, является то, что при меняющейся нагрузке соотношение между газом и воздухом остается постоянным. Установив при помощи шайбы желательное соотношение объемов газа и воздуха, в дальнейшем регулировать производительность горелки можно одним только вентилем — состав продуктов горения остается при этом постоянным.

---

* Эту формулу с достаточной для практики точностью можно применять при давлении до 150 кПа.

Преимущество горелок внутреннего смешения инжекционного типа состоит в том, что они обслуживаются одним трубопроводом и вентилем, нет необходимости в воздушной линии и дутьевом вентиляторе. Однако эти горелки чувствительны к давлению в печах, связанных с боровами и дымовой трубой.

Основной причиной шума, издаваемого горелками, по-видимому, являются собственные колебания (вибрации) горящих газов и шум от истечения газа из сопла и горящей газовоздушной смеси из туннеля; скорость истечения из туннеля, по данным В. А. Спейшера, может доходить до 180 м/с. Общий недостаток инжекционных горелок — большая длина.

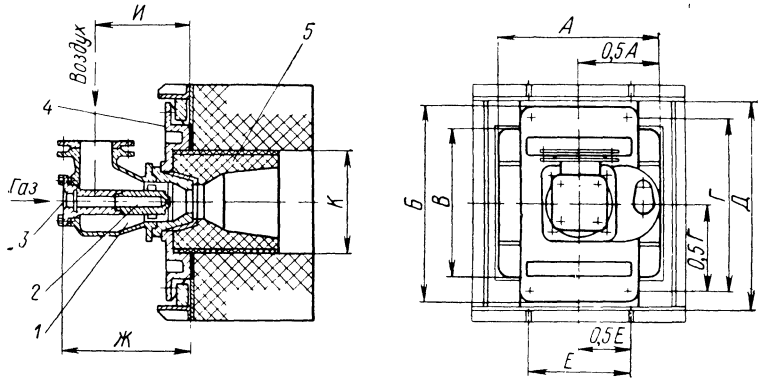


Рис. 142. Горелка ГНП конструкции Теплопроекта:
1 — плита; *2* — горелочный камень; *3* — наконечник сопла; *4* — корпус горелки; *5* — сопло для газа.

Двухпроводные дутьевые горелки для сжигания высокотеплотворных газов. Двухпроводные дутьевые горелки работают на газе и воздухе под давлением.

Горелки с принудительной подачей воздуха обычно работают на газе низкого давления, в ряде случаев они также работают и на газе среднего давления. Преимуществом этого типа горелок является то, что их можно применять в топочных устройствах с различной величиной противодавления, автоматически регулировать соотношение газа и воздуха. Горелки имеют малые габариты, работают бесшумно и обладают большой производительностью.

Горелки внешнего смешения практически нечувствительны к изменениям противодавления в печах. Их применяют, если топка работает с повышенным и переменным давлением (например, в случае барботажных концентраторов для серной кислоты, печей КС, требующих подвода тепла извне).

Хорошие эксплуатационные качества показали горелки конструкции Теплопроекта типа ГНП (горелка низкого давления для природного газа) при сжигании природного и смешанного газов (рис. 142). Газ выходит из ряда малых отверстий, расположенных под углом

к завихренному потоку воздуха (наконечник *3*), или одного центрального. Для завихрения воздуха на конце сопла *5* предусмотрены завихрители. Требуемый вариант сопел может быть получен с помощью съемных наконечников. Факел у этих горелок короткий. Диапазон регулирования составляет 1 : 4 при изменении давления газа. Конструктивные размеры даны в табл. 58.

Выбор горелок производят по графику или по производительности (табл. 59 и 60).

Таблица 58

Основные размеры горелок ГНП-1—ГНП-9 с плитами

Горелка	*А*	*Б*	*В*	*Г*	*Д*	*Е*	*Ж*	*И*	*К*	*Л*
ГНП-1	340	410	310	370	430	210	205	160	204	232
ГНП-2	340	410	310	370	430	210	220	170	204	232
ГНП-3	340	410	310	370	430	210	260	195	204	232
ГНП-4	340	410	310	370	430	210	290	215	204	232
ГНП-5	450	580	460	520	600	310	330	240	356	348
ГНП-6	450	580	460	520	600	310	365	260	356	348
ГНП-7	560	650	540	600	680	215	410	290	438	464
ГНП-8	560	650	540	600	680	215	460	325	438	464
ГНП-9	680	760	620	700	790	265	500	355	523	580

Примечание. Размеры *К* и *Л*—внутренние размеры горелочной плиты.

Таблица 59

Номинальные и минимальные тепловые мощности горелок (в кВт) и их расходные характеристики (в скобках в м³/ч) при соответствующих давлениях *Р* природного газа

Горелка	Наконечник сопла **тип *А***		Наконечник сопла тип *Б*		
	давление газа *Р* перед горелкой, Па				
	минимальное ($P=981$)	номинальное ($P=76\,480$)	минимальное ($P=981$)	номинальное	
				$P=39\,240$ для печей с $t\leqslant 600$ °С	$P=76\,480$ для печей с $t>600$ °С
ГНП-1	11,6 (1,2)	109,3 (11)	13,9 (1,4)	83.7 (8,5)	116,3 (12)
ГНП-2	17,4 (1,8)	168,6 (17)	19,7 (2)	127,9 (13)	182,5 (18,5)
ГНП-3	34,8 (3,5)	296,5 (30)	39,5 (4)	220,9 (22,5)	314 (32)
ГНП-4	48,8 (5)	476,8 (48)	54,6 (5,5)	348,9 (35)	494 (50)
ГНП-5	83,7 (8,5)	761,7 (77)	94,2 (9,5)	569,8 (58)	814 (82)
ГНП-6	116,3 (12)	1360,7 (138)	204,5 (14,5)	1023 (103)	1418,8 (144)
ГНП-7	174,4 (18)	2000 (202)	197,7 (20)	1430 (145)	2093 (211)
ГНП-8	267,4 (27)	2523,7 (255)	307 (31)	1860,8 (189)	2651,6 (268)
ГНП-9	348,9 (36)	3372,7 (340)	395 (40)	2558,6 (260)	5155 (365)

Таблица 60

Номинальные и минимальные тепловые мощности горелок (в кВт) и их расходные характеристики (в скобках в м³/ч) при соответствующих давлениях *P* сжиженного газа

Горелка	Наконечник сопла тип *А*		Наконечник сопла тип *Б*	
	давление газа *P* перед горелкой, Па			
	минимальное (*P* = 1472)	номинальное (*P* = 23 540)	минимальное (*P* = 981)	номинальное (*P* = 17 658)
ГНП-1	14,7 (0,6)	59,3 (2,4)	19,7 (0,8)	59,3 (2,4)
ГНП-2	24,6 (1,0)	98,6 (4)	33,7 (1,36)	98,6 (4)
ГНП-3	49,3 (2,0)	80,9 (3)	69,9 (2,8)	197,2 (8)
ГНП-4	73,9 (3,0)	295,4 (12)	75,6 (4,0)	286 (11,6)
ГНП-5	127,9 (5,2)	511,7 (20,8)	174,4 (7,05)	506 (20,5)
ГНП-6	197,7 (8,0)	788,5 (32)	272 (11,05)	788,5 (32)
ГНП-7	295,4 (12)	1183,9 (48)	393 (15,9)	1139,7 (46,2)
ГНП-8	381,4 (15,5)	1540,9 (62,5)	535 (21,7)	1550,2 (63)
ГНП-9	505,9 (20,5)	2023,6 (82)	651,3 (26,4)	1895,6 (77)

Горелки этого типа успешно работают и на подогретом воздухе. Они рассчитаны на сжигание природного газа с теплотой сгорания $Q_н^р$ = 35,6 МДж/м³ при α = 1,05.

Для сохранения теплопроизводительности при сжигании в них газа, отличающегося по характеристике от природного, паспортные данные давления газа и воздуха должны быть пересчитаны по следующим формулам:

давление газа

$$P'_г = P_г \frac{\rho'_{о.г}}{\rho_{о.г}} \left(\frac{Q_н^р}{Q'^р_н} \right)^2$$

давление воздуха

$$P'_в = P_в \left(\frac{Q_н^р V'_в}{Q'^р_н V_в} \right)^2$$

где $P_г$ — давление газа (паспортное), Па; $P'_г$ — давление газа (определяемое), Па; $P_в$ — давление воздуха (паспортное), Па; $P'_в$ — давление воздуха (определяемое), Па; $Q_н^р$ — теплотворная способность газа (паспортная), МДж/м³; $Q'^р_н$ — теплотворная способность газа (имеющегося в наличии), МДж/м³; $\rho_{о.г}$ — плотность газа (паспортная), кг/м³; $\rho'_{о.г}$ — плотность газа (имеющегося в наличии), кг/м³; $V_в$ — объем воздуха (паспортный), м³/м³ газа; $V'_в$ — объем воздуха (необходимого), м³/м³ газа.

Во вращающихся и тамбурных печах, в которых требуется длинный факел, целесообразно устанавливать горелки конструкции Стальпроекта типа ДВ (рис. 143), имеющих одиннадцать размеров горелок с диаметром выходных сечений воздушных коробок от 200 до 425 мм (табл. 61).

Выбор горелки и сопла к ней осуществляется по графику (рис. 144). График составлен для газа с температурой 20 °С, теплотой сгорания 35 МДж/м³ и плотностью 0,77 кг/м³ и для воздуха с температурой 20 °С при условии сжигания с коэффициентом избытка воздуха α = = 1,08.

Сначала по правой части графика выбирают диаметр сопла в зависимости от необходимости расхода газа и давления его перед горелкой. Затем по левой части графика (показано пунктиром) находят

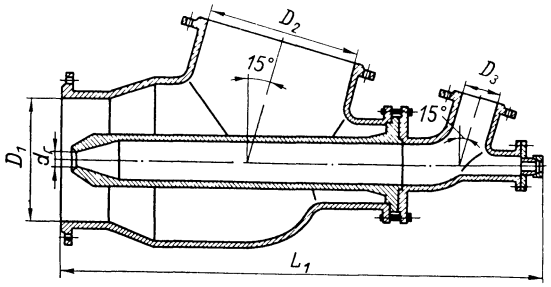


Рис. 143. Горелка конструкции Стальпроекта типа ДВ.

тип горелки в зависимости от располагаемого давления воздуха перед ней. Если используют газ другой плотности, выбор сопла производят по расчетному давлению $P_{расч}$:

$$P_{расч} = P_д \frac{\rho}{0{,}77}$$

где $P_д$ — давление газа, Па; ρ — плотность, кг/м³.

При употреблении газа с любым коэффициентом избытка воздуха α количество воздуха следует пересчитать с учетом заданного значения α.

Таблица 61

Конструктивные размеры горелки ДВ конструкции Стальпроекта

Горелка	$Д_1$	$Д_2$	$Д_3$	L_1	Масса, кг
ДВ-200/$d_г$	200	300	100	1331	232,0
ДВ-225/$d_г$	225	300	100	1331	232,0
ДВ-250/$d_г$	250	350	100	1331	247,0
ДВ-275/$d_г$	275	350	100	1331	247,0
ДВ-300-1/$d_г$	300	400	100	1331	282,0
ДВ-300-11/$d_г$	300	450	150	1551	393,0
ДВ-325/$d_г$	325	450	150	1551	395,0
ДВ-350/$d_г$	350	500	150	1551	408,0
ДВ-375/$d_г$	375	500	150	1551	410,0
ДВ-400/$d_г$	400	500	150	1551	417,0
ДВ-425/$d_г$	425	500	150	1551	419,0

Примечание. Величина $d_г$ выбирается по таблице сопел.

Выбор сопла производится как указано на стр. 352, а выбор горелки по левой части рис. 144 в зависимости от найденного расхода воздуха и давления воздуха перед горелкой. Подогрев воздуха допускается не выше 400 °С.

Хорошие эксплуатационные качества показала двухпроводная горелка (рис. 145). Размеры горелки и производительность даны в табл. 62. Она рассчитана на сжигание высококалорийного газа. Газ поступает по центральной трубе и перед выходом закручивается, воздух подается по малым отверстиям под углом к завихренному потоку газа. Горелка рассчитана для работы с коэффициентом расхода воздуха до $\alpha = 1{,}7$. Эта горелка снабжена автоматическим запальником и не сложна в изготовлении.

Таблица 62

Размеры двухпроводной горелки

Производительность, м³/ч	*А*	*Б*	*В*	*Г*	*Л*	*Д*	$Д_1$	$Д_2$	$Д_3$	$Д_4$	$Д_5$	$Д_6$	$Д_7$	$Д_8$	$Д_9$
610	450	465	243	240	1140	280	350	395	425	125	210	250	450	500	525
450	395	315	202	240	910	185	251	295	325	100	180	220	305	345	375

Двухпроводные дутьевые горелки для сжигания низкотемпературных газов. Для сжигания коксового, смешанного, генераторного и печного газов от фосфорных печей можно рекомендовать горелку типа ГН конструкции Теплопроекта (рис. 146).

Газ выходит через центральное сопло, воздух через завихрители, отлитые на корпусе сопла *1*. Характеристика горелки приведена в табл. 63.

Таблица 63

Характеристика горелок типа ГН

Газ	Номинальная производительность горелок при холодном воздухе, м³/ч								
	ГН-1	ГН-2	ГН-2А	ГН-3	ГН-4	ГН-5	ГН-6	ГН-7	ГН-8
Коксовый ($Q_н^р = 16{,}8$ МДж/м³) . .	6	12	18	25	50	85	125	190	250
Смешанный ($Q_н^р = 8{,}4$ МДж/м³) . .	11	22	32	45	90	150	230	350	460
Генераторный ($Q_н^р = 3{,}4$ МДж/м³) . .	—	—	45	60	120	200	300	450	600

Горелки газовые специального назначения. *Горелки газовые вихревые* ГВП разработаны ГипроНИИГазом для установки на вращающихся печах. Это длиннопламенные горелки и позволяют влиять на характеристику факела изменением

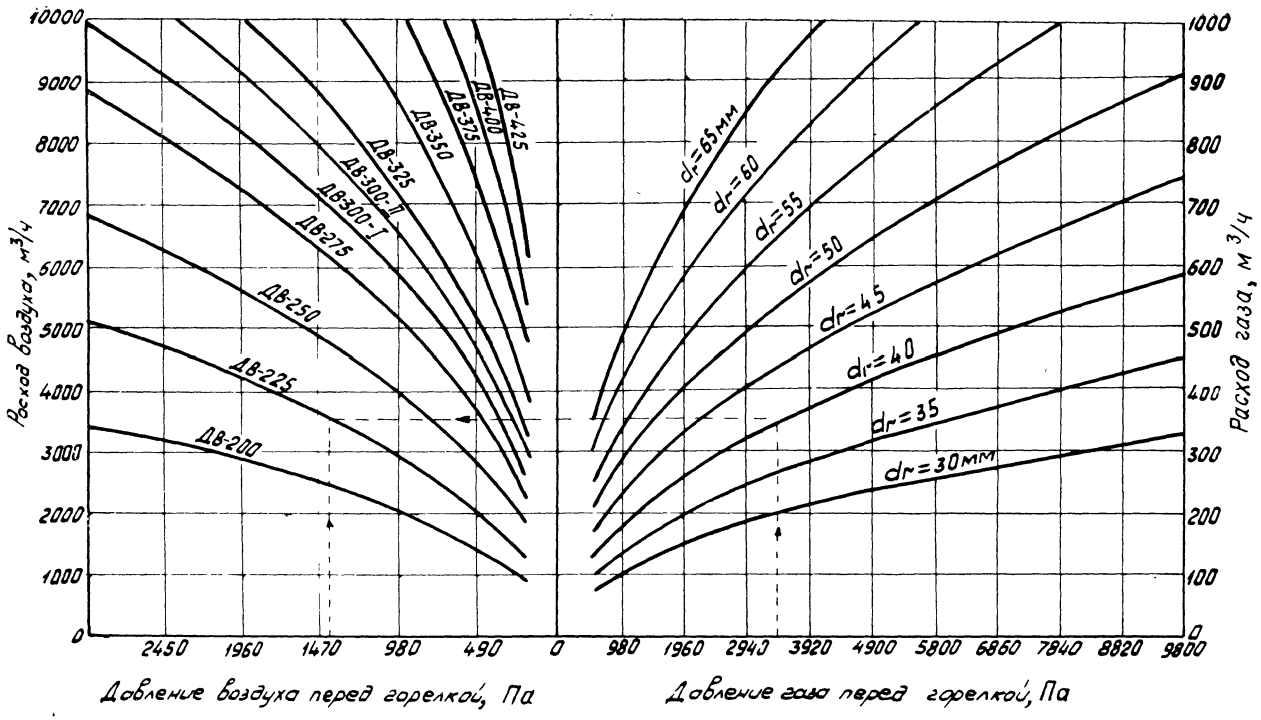


Рис. 144. График для выбора горелки и сопла к ней.

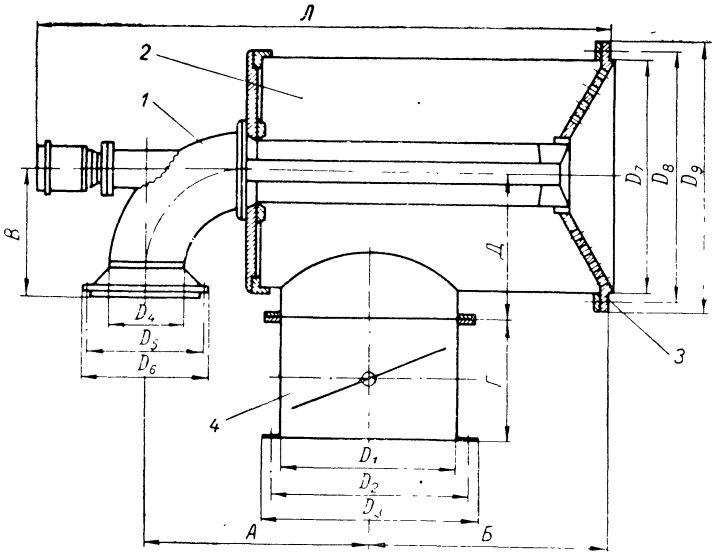


Рис. 145. Двухпроводная горелка:
1 — сопло для газа; *2* — воздушный короб; *3* — сопло для воздуха; *4* — заслонка.

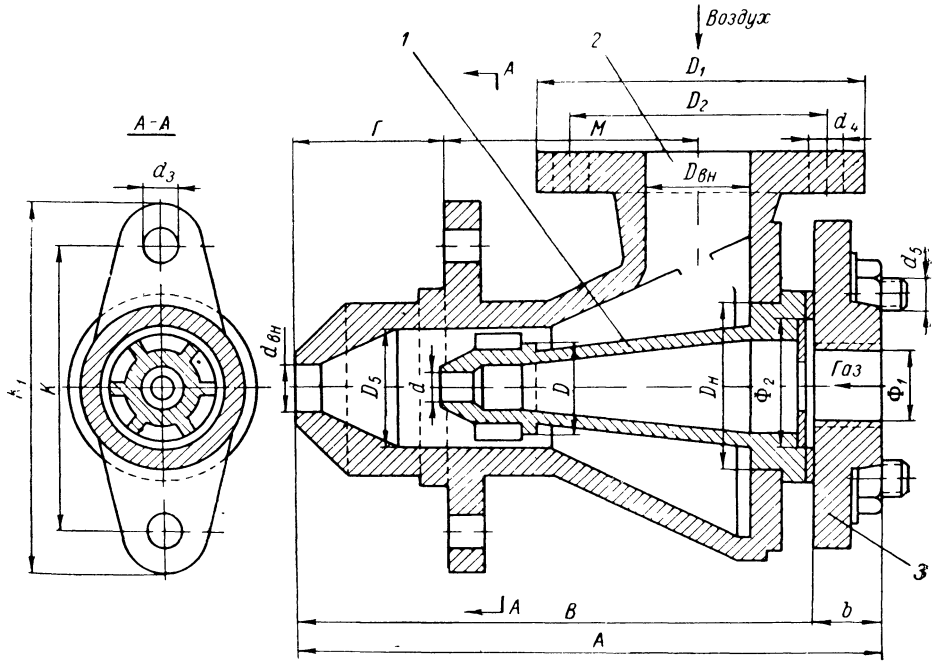


Рис. 146. Горелка ГН конструкции Теплопроекта:
1 — сопло для газа; *2* — корпус; *3* — фланец.

скорости истечения природного газа из сопла при постоянном расходе его и искусственной турбулизацией потока газов при помощи завихрителя.

Скорость истечения газа регулируется изменением давления газа и проходного сечения устья горелки с помощью подвижного дросселя. Искусственная турбулизация потока достигается его закручиванием и увеличением угла раскрытия при помощи завихрителя с лопатками, расположенными тангенциально под постоянным

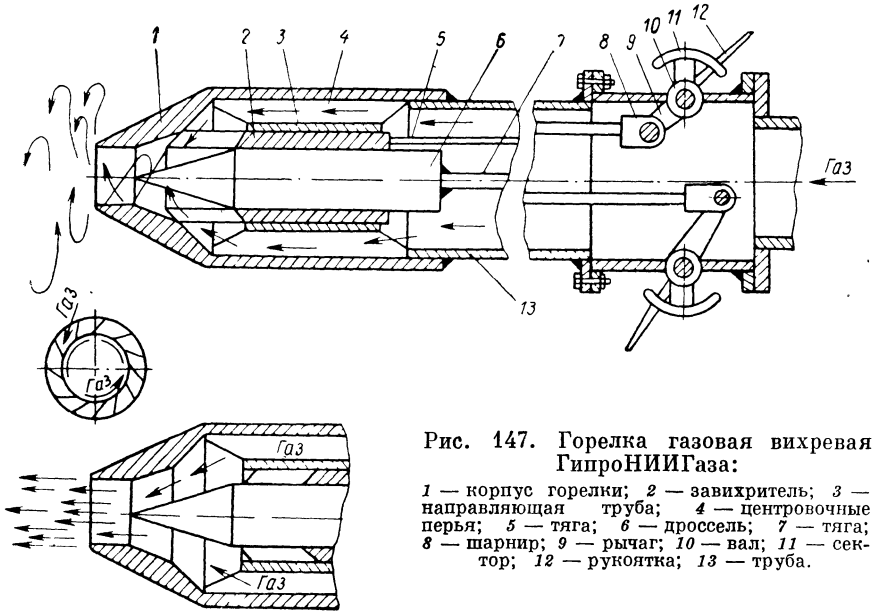


Рис. 147. Горелка газовая вихревая ГипроНИИГаза:

1 — корпус горелки; *2* — завихритель; *3* — направляющая труба; *4* — центровочные перья; *5* — тяга; *6* — дроссель; *7* — тяга; *8* — шарнир; *9* — рычаг; *10* — вал; *11* — сектор; *12* — рукоятка; *13* — труба.

углом к оси горелки. Завихритель создает вращательное движение проходящему потоку газов. Диапазон регулирования скорости выхода газа 200—800 м/с.

Конструкция горелки приведена на рис. 147, а техническая характеристика в табл. 64.

Схема работы горелки следующая: газ из газопровода поступает в трубу *13* и, обтекая внешнюю поверхность трубы *3*, проходит к соплу корпуса горелки. При крайнем левом положении завихрителя весь газ, выходя из лопаток его в сопло, будет иметь поступательное и вращательное движение. В этом случае при выходе из сопла струя газа будет иметь коническую форму. При крайнем правом положении завихрителя газ будет входить в сопло горелки, не проходя между лопатками завихрителя, следовательно, будет выходить из сопла без вращательного движения, что удлинит факел от горелки. Зона наивысшей температуры факела переместится в глубь печи.

Для еще большего перемещения зоны наивысшей температуры и изменения светимости факела можно изменять давление газа в го-

релке, сохраняя ее производительность путем уменьшения или увеличения сопла посредством перемещения дросселя *6*.

Производительность горелок от 500 до 30 000 м³/ч при диаметрах выходного сечения сопел от 20 до 200 мм. Горелки ГВП хорошо работают и позволяют регулировать длину факела.

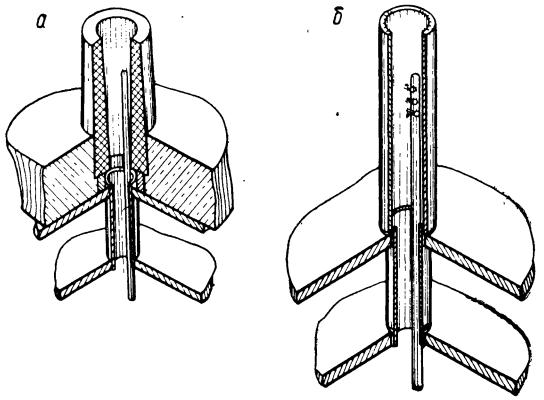


Рис. 148. Горелки для сжигания природного газа в кипящем слое:
а — с шамотным стаканом; *б* — с металлическим стаканом.

Горелки для сжигания природного газа в кипящем слое. В печах КС топливный газ или газовоздушная смесь сжигается непосредственно в кипящем слое материала. Особенностью большинства горелок этого типа является то, что они одновременно выполняют роль псевдоожижающего устройства. На рис. 148 приведены конструкции горелок этого типа. В горелке *а* сжигание топливного газа происходит

Таблица 64

Техническая характеристика горелок ГВП

Горелка	Номинальная тепловая нагрузка, МВт	Номинальный расход газа, м³/ч	Диаметр сопла, мм	Предел регулирования по расходу, м³/ч	Диаметр корпуса *А*, мм
ГВП4	5	500	20	50—500	60
ГВП6	5	500	22	50—500	75
ГВП3	20	2 000	44	200—2000	98
ГВП1	50	5 000	70	500—5000	140
ГВП5	80	8 000	90	800—8000	170
ГВП3	120	12 000	120	1200—12 000	219
ГВП2М	120	12 000	120	1200—12 000	219
ГВП8	200	20 000	160	2000—20 000	325
ГВП7	300	30 000	200	3000—30 000	351

Примечания: 1. Номинальное движение газа и пределы регулирования по давлению от 0,04 до 3 МПа. 2. Длина горелки принимается в зависимости от конструкции печи.

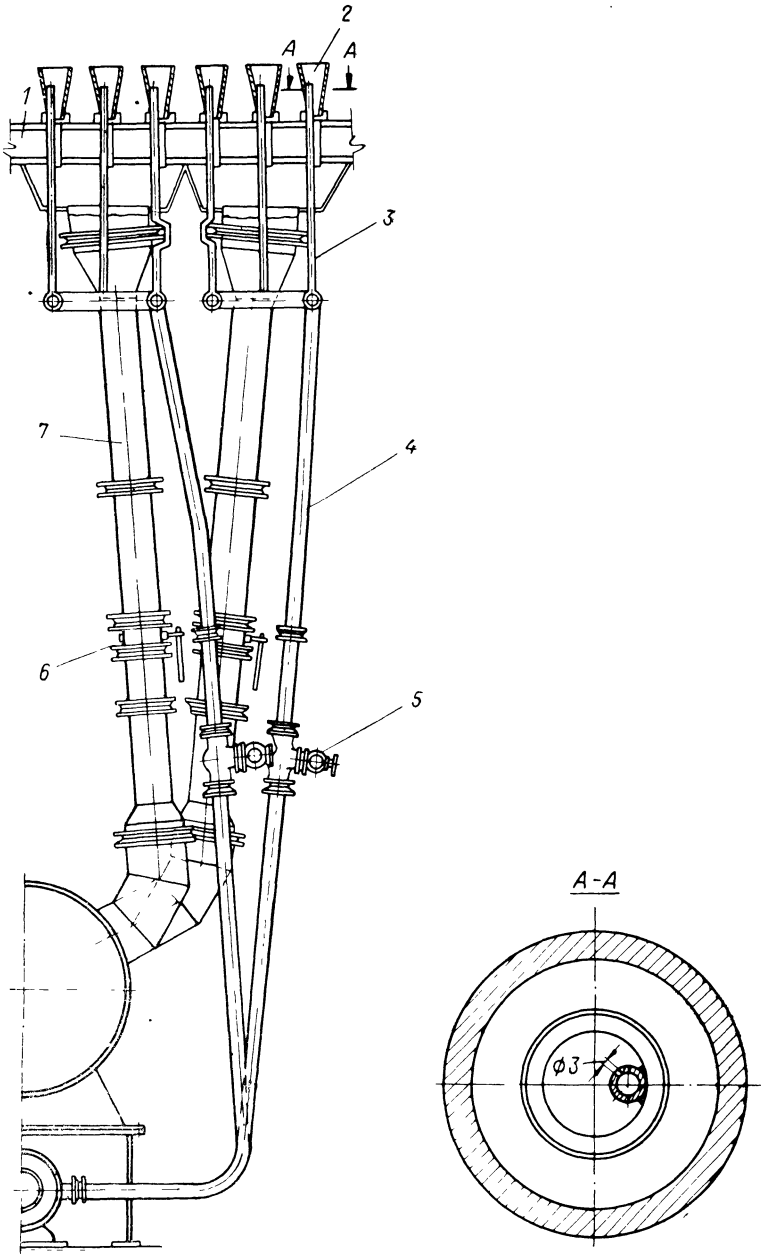


Рис. 149. Система газоснабжения горелок с регулирующей аппаратурой:

1 — распределительный короб; *2* — стакан; *3* — газопровод; *4* — коллектор для газа; *5* и *6* — задвижки; *7* — воздухопровод.

непосредственно в шамотном стакане и в кипящий слой подают дымовые газы, имеющие высокую температуру, которые псевдоожижают материал. В горелке *б* стакан выложен из жаропрочной стали. Воздух на горелке этих горелок подается из распределительного короба, являющегося одновременно и подиной печи.

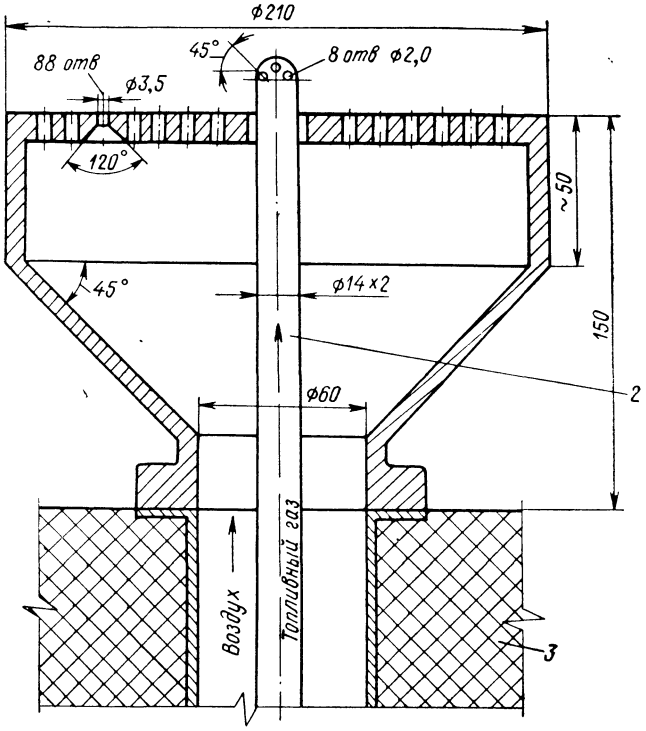


Рис. 150. Горелка газовая для сжигания природного газа в кипящем слое:
1 — воздухораспределительная насадка; *2* — газопровод; *3* — подставка.

На рис. 149 приведена вся система снабжения горелок с регулирующей арматурой. Воздухораспределительная коробка также является подиной печи. Металлические стаканчики выполнены в виде усеченного конуса. Труба, подводящая топливный газ, смещена относительно оси конуса для лучшего перемешивания газа с воздухом и горения с коротким факелом.

На рис. 150 приведена горелка газовая, где топливный газ подается в слой через трубку диаметром 14 мм, а воздух на горение через 88 отверстий диаметром 3,5 мм, просверленных на цилиндроконическом стакане. Горелку устанавливают на печи КС для обесфторивания фосфатов.

Горелка керамическая предназначена для сжигания печного газа от фосфорных руднотермических печей в теплоиспользующих устройствах. Конструкция горелки приведена на рис. 151. Печной газ

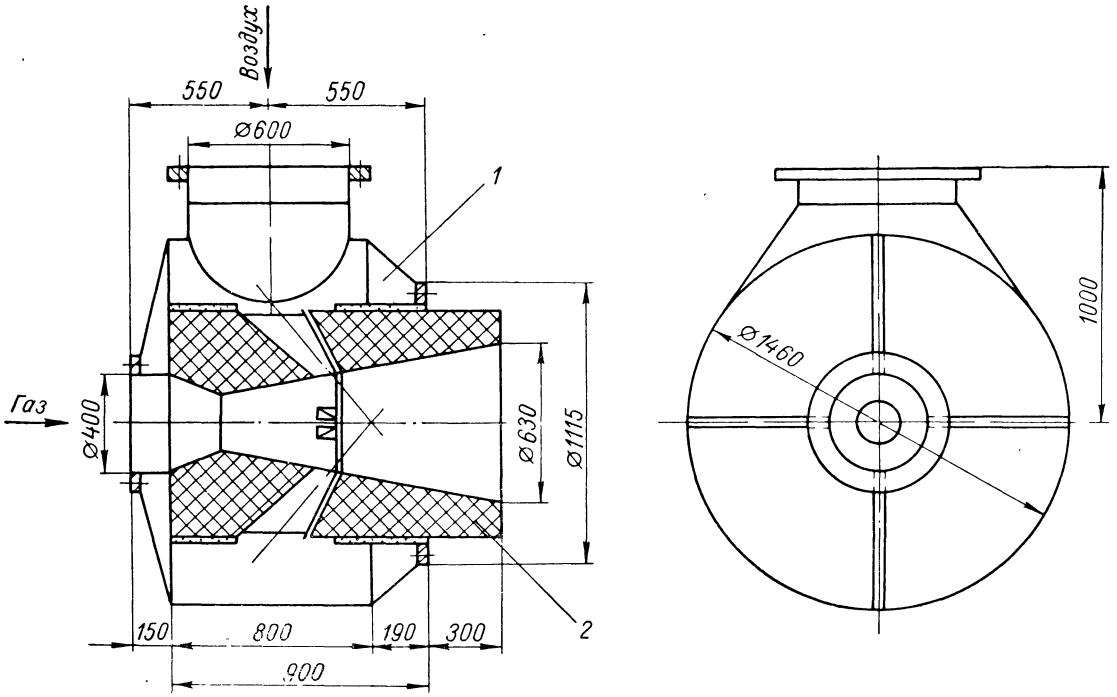


Рис. 151. Горелка керамическая двухпроводная:
1 — корпус; *2* — горелочный камень.

подается через патрубок непосредственно в керамический туннель, в которую тангенциально подается также воздух на горение, здесь производится перемешивание печного газа воздухом и часть газовоздушной смеси сгорает в туннели, а остальное в топочной камере.

Производительность горелки 450—4500 м³/ч печного газа. Необходимое давление печного газа перед горелкой 2 кПа и давление воздуха 3 кПа.

Керамический туннель изготовляется из высокоглиноземистого шамота и состоит из восьми частей. В туннели под углом 40° сделаны восемь сопел, расположенных тангенциально и имеющих входное отверстие 250 × 170 и выходные 190 × 55. Максимальная скорость воздуха по выходе из сопла 45 м/с.

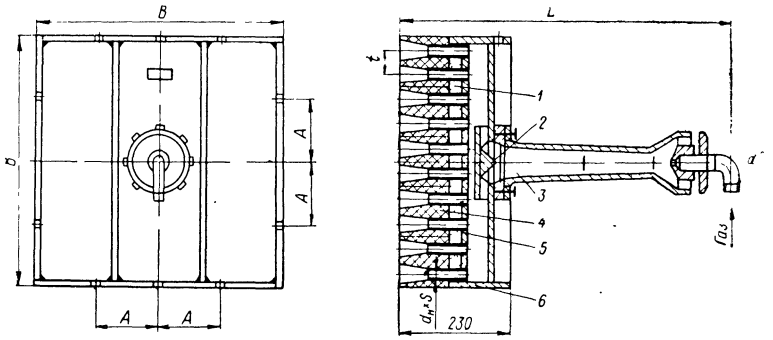


Рис. 152. Горелка панельная конструкции Гипронефтемаша:
1 — диатомовый порошок; *2* — конус; *3* — смеситель; *4* — керамическая призма; *5* — сопло; *6* — распределительная камера.

Горелки панельные ГБП предназначены для сжигания топливного газа в трубчатых печах; они разработаны в Гипронефтемаше.

Особенностью горелки является то, что она создает направленный тепловой поток со значительной площадью излучения. У этих горелок предварительно подготовленная газовоздушная смесь горит в мелких туннелях, объединенных в керамическую панель. На все панели одной горелки установлен общий инжекционный смеситель.

Конструкция горелки приведена на рис. 152. Горелка состоит из распределительной камеры, сваренной из листовой стали толщиной 4 мм, трубки, соединяющей распределительную камеру с керамическими туннелями, изоляционной прослойки из диатомовой крошки керамических призм, свободно надевающихся на трубки, и смесителя, служащего для подготовки газовоздушной смеси. Зазоры между призмами образуют температурные швы и способствуют повышению стойкости трубной доски. Призмы изготовлены из огнеупорной массы следующего состава (по объему): 68% шамота класса А, 26% латненской глины и 6% асбестита. Огнеупорность таких призм составляет 1700 °С при термостойкости 50 теплосмен. В горелках практически отсутствуют внешние потери тепла через излучающую панель, так как это тепло в значительной степени воспринимается газовоздушной смесью и возвращается в печь.

Для предотвращения выпадания свободно посаженных керамических призм в сводовом исполнении они имеют бороздки и закрепляются к металлическому коробу круглыми стержнями диаметром 6 мм, последние на концах имеют резьбу для гайки.

Температура в туннелях зависит от температуры в камере печи. При температуре в печи 800—1200 °С она составляет 1100—1400 °С и при снижении температуры в печи до 200—400 °С она снижается до 960—1250 °С.

При исследовании панельных горелок установлено, что они обеспечивают практически полное сжигание газа при работе с коэффициентом расхода воздуха $\alpha = 1{,}02$. Однако значение α меняется в зависимости от изменения нагрузки. С увеличением нагрузки температура излучающей поверхности панели возрастает, а температура тыльной поверхности снижается за счет более интенсивного охлаждения. Характеристика панельной горелки приведена в табл. 65.

Таблица 65

Характеристика панельных горелок ГБП

Горелка	Тепловая мощность, кВт	Техническая характеристика		Основные размеры				d^2, дюйм	Масса, кг
		$d_н$	количество трубок	t	L	B	A		
ГБП-35	40	6	100	50	740	500	125	1/2	85
ГБП-55	64	6	144	50	740	605	150	1/2	110
ГБП-85	99	8	100	50	740	500	125	1/2	92
ГБП-120	140	10	144	50	740	605	150	1/2	118
ГБП-140	163	10	100	50	740	500	125	1/2	89
ГБП-200	233	10	144	50	740	605	150	1/2	124
ГБП-280	326	10	196	35,7	945	500	125	—	94
ГБП-400	465	10	289	35,7	945	605	150	1	131
ГБП-530	617	10	365	35,7	945	500	125	—	100

Горелка газовая для нагрева металлических изложниц. Горелка предназначена для нагрева изложниц разливочного конвейера феррофосфора, поступающего из руднотермической электропечи. Нагрев изложниц необходим для удаления влаги. Конструкция горелки приведена на рис. 153. Горелка сварная состоит из сварного корпуса *1*, блока из 6 сопел для газовоздушной смеси, устанавливаемых на 6 соплах *3*. Блок из сопел имеет сальниковое уплотнение. Факел при горении газа получается широким и плоским. Горелки устанавливаются на специальный металлический каркас под углом 30° к горизонту. Конвейер с изложницами проходит над горелками и нагревается.

Природный газ и воздух на горение подаются к патрубкам. Расход газа на горелку составляет 60 м³/ч.

Центральная пирамидальная горелка предназначена для сжигания природного газа в известково-обжигательной печи. Конструкция

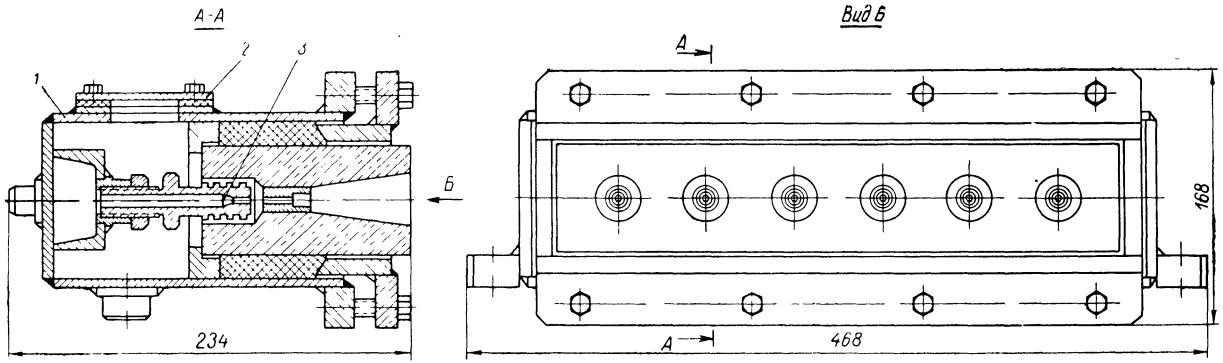


Рис. 153. Горелка газовая для нагрева изложниц:
1 — корпус; *2* — крышка; *3* — сопло.

горелки приведена на рис. 154. Горелка сварной конструкции из Ст.3 представляет собой пирамидальное устройство, состоит из

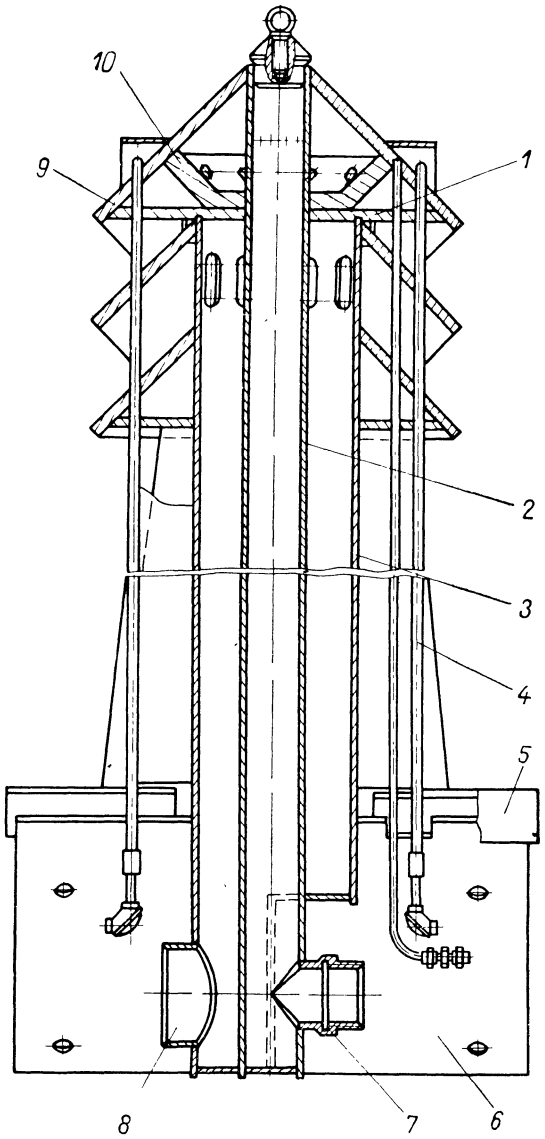


Рис. 154. Горелка газовая центральная:
1 — перфорированный диск; *2* — внутренняя труба; *3* — наружная труба; *4* — термопара; *5* — лист; *6* — боковина; *7* — патрубок для газа; *8* — патрубок для воздуха; *9* — конус для газа; *10* — конус с соплами.

двух труб, расположенных коаксиально — труба *2* подачи топливного газа и труба *3* подачи рециркуляционного газа и конических колпаков.

Расход топливного газа составляет 533 м³/ч. Давление топливного газа перед горелкой 2,5 МПа, расход рециркуляционного газа 1600 м³/ч. Давление рециркуляционного газа 4100 Па.

Смесь природного газа, рециркуляционных газов и воздуха поступает в нижнюю часть зоны обжига и воспламеняется, сгорая в основном непосредственно в зоне обжига.

Горелка фурменная периферийная. Горелка предназначена для сжигания природного газа в обжиговой зоне известково-обжигательной печи и разработана ВНИИСтромом. Конструкция ее приведена на рис. 155.

Горелка состоит из металлического сборного короба, устанавливаемого в кладку печи. В короб вставляется защитный козырек *2*,

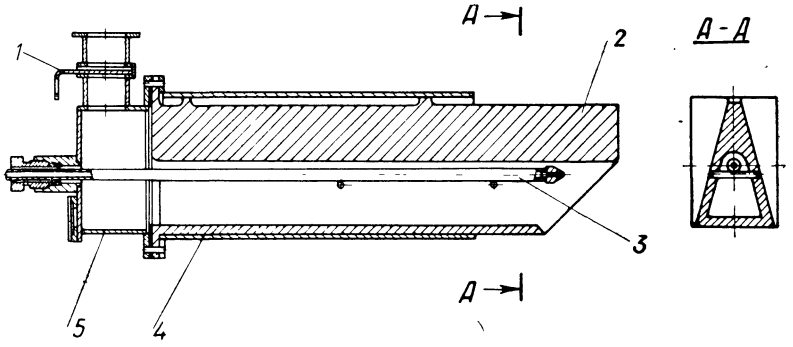


Рис. 155. Горелка газовая, фурменная, периферийная:
1 — шибер; *2* — козырек; *3* — труба для газа; *4* — фурма внешняя; *5* — короб воздухопровода.

имеющий коническую форму, внутри которой проходит труба *3*. К защитному козырьку крепится короб *4* с фланцем, через который проходит труба *3* с сальниковым уплотнителем. На коробе имеется гляделка. Горелка представляет собой разновидность диффузионных горелок.

Горелка погружного горения. Основным элементом аппаратов погружного горения являются горелки, в которых сжигается газовоздушная смесь. Конструктивно такие горелки можно разделить на три типа: туннельные, циклонные и диафрагмовые. К горелкам этих типов предъявляются дополнительные требования:

а) глубина погружения горелки должна быть такой, при которой эффективность поглощения тепла раствором была максимальной;

б) необходимы стабильный режим работы *, легкая управляемость в процессе зажигания, эксплуатации и затухания;

в) при выпаривании насыщенных и кристаллизующихся растворов необходимо выбирать такой режим работы горелки, при котором отходящие газы из выхлопного отверстия не допускали бы отложения солей на внутренней накаленной поверхности горелки.

---

* Под стабильным режимом работы горелки понимается неподвижное положение зоны горения относительно выхлопного отверстия.

На рис. 156 приведена горелка погружного горения туннельного типа конструкции ВНИИГа. Эту горелку используют для нагревания и выпаривания жидкостей в открытых и закрытых сосудах.

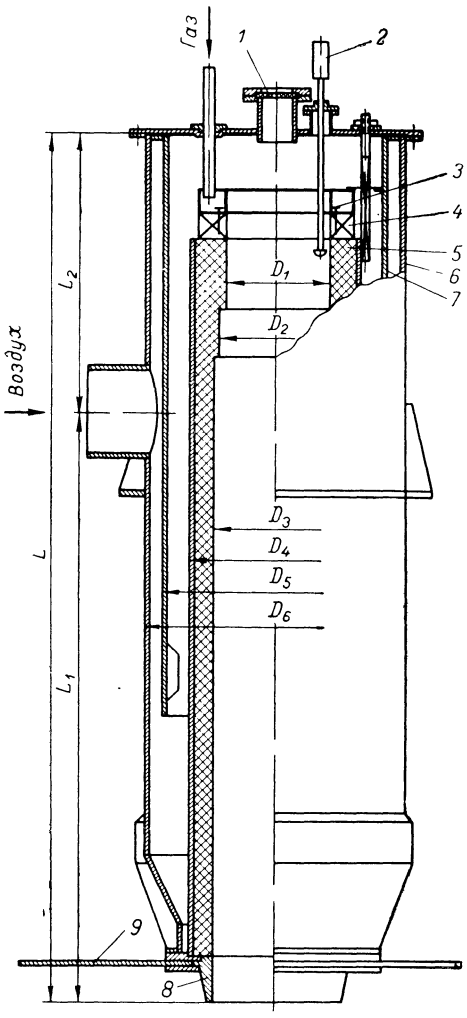


Рис. 156. Горелка погружного горения туннельного типа ВНИИГа:

1 — гляделка; *2* — запальник; *3* — наконечник; *4* — смесительная камера с лопастным завихрителем; *5* — футеровка; *6* — корпус воздушной рубашки; *7* — корпус воздухоохладительного стакана; *8* — барботер; *9* — насадка.

Смешение воздуха и газа в горелке начинается на каналах лопастного завихрителя. Интенсивность перемешивания горючей смеси достигается установкой галевых наконечников — «пальцев». Из камеры смешения газовоздушная смесь поступает в камеру сгорания. Это металлический кожух, внутри выложенный огнеупорным материалом.

В качестве огнеупорного материала используется шамотная крошка, замешанная с огнеупорной глиной, которая наносится на стенку кожуха и после сушки прокаливается. Кожух камеры изготовляется из углеродистой стали; если упариваемый раствор агрессивен, то воздуходелительный стакан выполняется из нержавеющей стали. Выходная насадка выполняется из стали.

Туннельные горелки небольших размеров зажигают на воздухе и при достижении полного сгорания газа (когда пламя будет находиться внутри камеры горения), горелку погружают в жидкость. Большие туннельные горелки могут зажигаться и в погруженном состоянии.

Характеристика горелок туннельного типа приведена в табл. 66. В табл. 67 приведены конструктивные размеры этих горелок.

На рис. 157 изображена погружная горелка циклонного типа конструкции ВНИИГа.

Здесь воздух под давлением 20 кПа через щель по касательной подается в камеру смешения. Газ под давлением 24,5—34,3 кПа

Таблица 66

Характеристика горелок погружного горения ВНИИГа туннельного типа

	Горелка	
	большая	малая
Теплопроизводительность, МВт	9,3	2,32
Расход газа на горение $Q_н^р = 36$ МДж/м³	940	235
Расход воздуха, м³/ч	14 300	3500
Коэффициент избытка воздуха α	1,6	1,6
Давление (избыточное) у горелки, кПа	120	120
Гидравлическое сопротивление (избыточное), кПа	110	110
Диаметр камеры сгорания, мм	720	540
Длина камеры сгорания, мм	3500	1750
Диаметр кратера, мм	535	290
Глубина погружения, мм	450	250

Таблица 67

Размеры горелок погружного горения туннельного типа

Теплопроизводительность	$Д_1$	$Д_2$	$Д_3$	$Д_4$	$Д_5$	$Д_6$	L_1	L_2	L
2,32 МВт	290	360	410	540	635	715	1840	640	2480
9,3 МВт	535	660	720	990	1180	1370	3100	1500	4600

по патрубку поступает в перфорированный наконечник *11*. Из него газ распределяется по всему сечению трубы и смешивается с воздухом. Горючая смесь, двигаясь одновременно поступательно и вращательно, интенсивно перемешивается и, соприкасаясь со смесительной трубкой *2*, подогревается до температуры воспламенения. Затем, попадая в камеру сгорания *4*, горючая смесь воспламеняется и полностью сгорает. Продукты сгорания, выходящие из горелки, имеют вихревое движение, что ускоряет их барботаж в жидкости и предотвращает возможное зарастание выходного отверстия.

Горелки циклонного типа широко применяются, так как они могут работать при меньшем давлении газа и воздуха, чем туннельные горелки: установлено, что вибрация аппарата с данной горелкой меньше, чем с горелкой другого типа.

Все рассмотренные выше горелки могут работать на всех известных горючих газах (например, светильный, природный, печной), что очень важно в химической промышленности при наличии в отдельных производствах печного газа (как отхода производства).

Характеристика погружной горелки циклонного типа следующая:

Теплопроизводительность	1,16 МВт
Теплотворная способность газа	36 МДж/м³
Расход газа	118 м³/ч
Коэффициент избытка воздуха α	1,6
Расход воздуха на горение	1800 м³/ч
Давление в горелке	20 кПа
Диаметр камеры сгорания	200 мм
Диаметр кратера	80 »
Длина камеры сгорания	1200 »

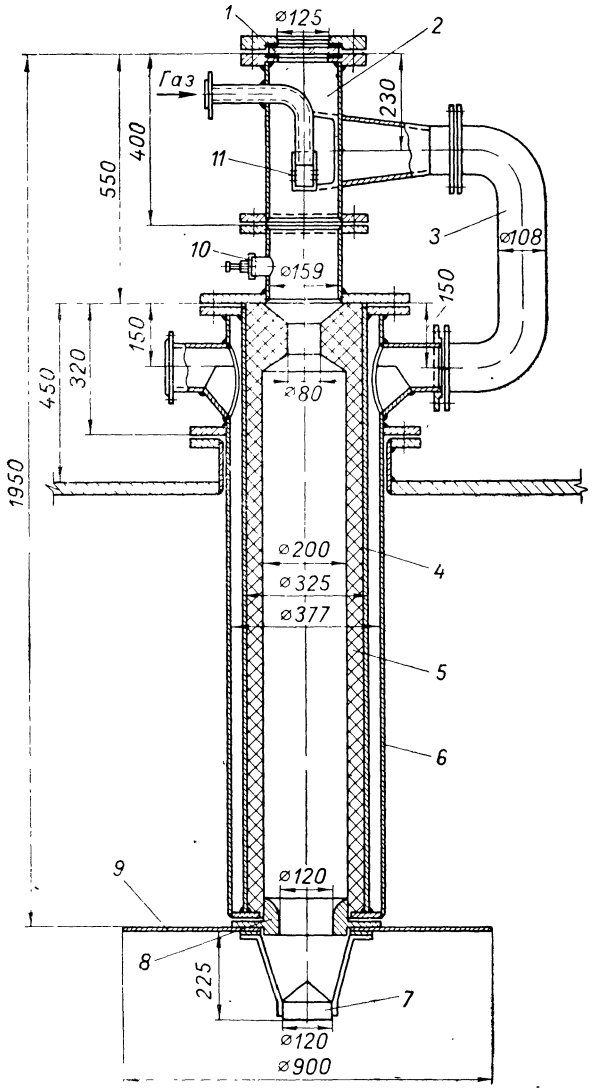


Рис. 157. Горелка погружного горения циклонного типа ВНИИГа:

1 — гляделка; *2* — труба для смешения; *3* — колено воздухопровода; *4* — кожух камеры горения; *5* — футеровка; *6* — корпус воздушной рубашки; *7* — конус; *8* — насадка выходная; *9* — барботер; *10* — запальник; *11* — перфорированный наконечник.

Горелка для совместного сжигания природного и печного газа от фосфорных печей. При получении желтого фосфора печной газ CO является отходом производства и его можно использовать как топливо в других производствах. Однако в период пуска фосфорных печей при отсутствии печного газа как топливо используется природный газ. Для сжигания их в отдельности в топках служит трехпроводная комбинированная горелка (рис. 158), которая показала хорошие результаты и может быть использована и для совместного сжигания других газов.

Печной газ CO от фосфорных печей имеет теплоту сгорания ($Q_н^р \simeq$ $\simeq$ 11,7 МДж/м³).

Конструкция горелки весьма проста и изготовляется она сваркой из труб различного диаметра. В центральную трубу *1* с двух сторон приварены трубы для подвода природного и печного газов. На конец центральной трубы насажена передвижная труба для удлинения или укорочения центральной, т. е. увеличения или уменьшения зазора между трубой и горелочным камнем, этим достигается изменение скорости выхода воздуха из горелки, необходимого для регулирования длины факела. Регулирование положения этой трубы производится открытием люка на торце центральной трубы. Труба *1* при помощи фланца крепится к трубе *2*, имеющей на конце фланец для крепления к топке печи. Горелочный камень *3* изготовляется из высокоглиноземистого шамота.

Горелка может работать с коэффициентом избытка воздуха α, равным 1,7, и является разновидностью горелок «труба в трубе», но с более коротким факелом.

Горелка для сжигания хлора в струе водорода предназначена для синтеза хлористого водорода. Конструкция горелки приведена на рис. 159. Она состоит из двух концентрически расположенных труб. Внутренняя труба, по которой подается хлор, выполнена из стали 1Х18Н9Т; внешняя — по которой движется водород — выполняется из динаса. Для предохранения наружной поверхности горелки от коробления промежуток между ней и динасовой трубой уплотняется асбестовым шнуром.

Верхний конец трубы для хлора устанавливается несколько ниже верхнего конца трубы для водорода, что обеспечивает полное сжигание хлора в среде водорода и исключает возможность образования взрывоопасной смеси в печи.

Хлор и водород подают в горелку с неодинаковой скоростью. Величина этих скоростей и разница между ними дают возможность хорошо перемешивать газы и этим сократить длину факела.

Теоретическая температура пламени хлористого водорода при стехиометрическом соотношении хлора и водорода равна 2240 °С. Однако избыток водорода и примесь прочих газов снижают эту температуру до 1000—1200 °С.

Необходимость работы с избытком водорода обусловливается и тем, что образующийся на стенках печи $FeCl_2$ может окисляться до $FeCl_3$ в присутствии хлора и кислорода, что важно для предохранения стенок печи от коррозии.

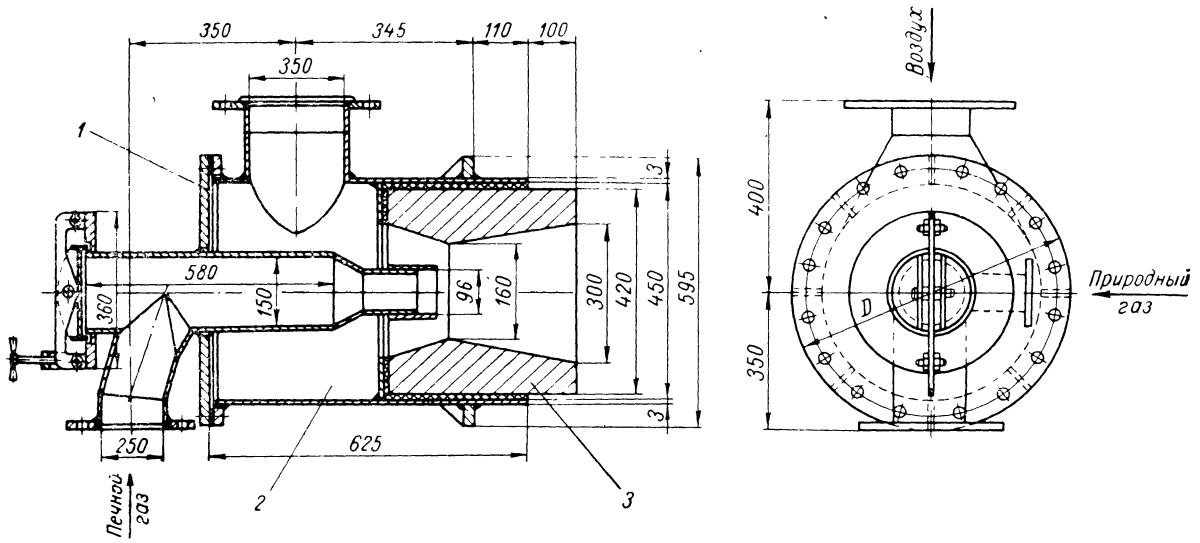


Рис. 158. Горелка трехпроводная:

1 — труба для подвода газа; *2* — труба для подвода воздуха; *3* — горелочный камень.

Избыток водорода частично сгорает в печи за счет кислорода, поступающего в печь с хлором и водородом. При избытке водорода пламя имеет голубоватый цвет; небольшой избыток хлора окрашивает его в зеленоватый цвет. Регулировка поступающего в горелку газа производится автоматически установленными на газопроводах приборами.

Давление водорода перед горелкой 180 кПа. Производительность описанной горелки 12 т/сутки HCl.

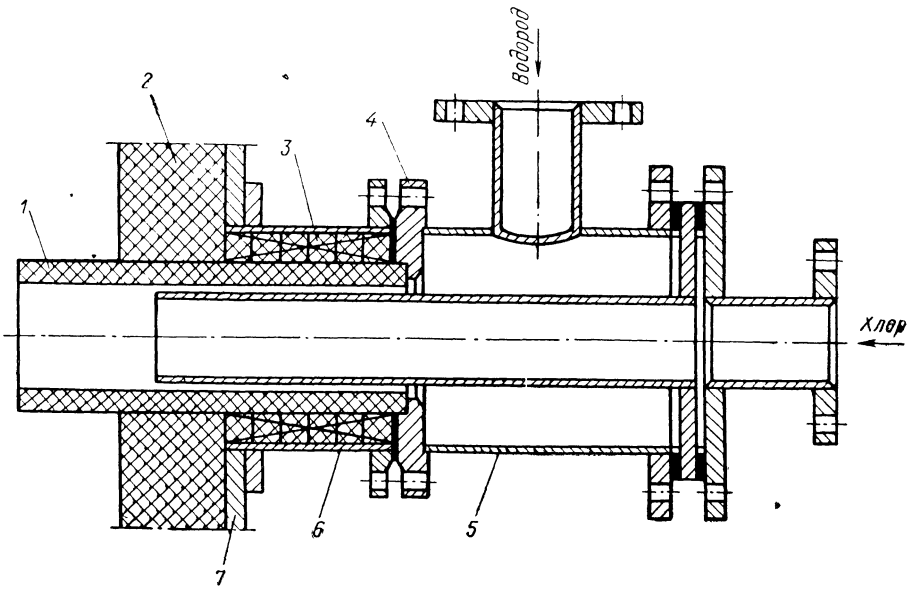


Рис. 159. Горелка для сжигания хлора в струе водорода:
1 — наконечник; *2* — теплоизоляция; *3* — набивка; *4* — фланец; *5* и *6* — трубы; *7* — плита.

Запальные горелки. Для розжига основных стационарных горелок применяют специальные переносные газовые запальные горелки. Их применяют при использовании газа низкого и среднего давления. Основное требование, предъявляемое к запальным горелкам, это устойчивость факелов при достаточной его мощности, простота и легкость пользования.

На рис. 160 показаны запальные горелки различных типов.

Для топок, работающих под разрежением, можно применять одно- и многофакельные запальные горелки. Для горелок, работающих на газе низкого давления и установленных в топках, работающих под давлением, должны применяться запальники с принудительной подачей воздуха. Газ вдувается через сопло *1* соответствующего размера в трубу-смеситель *2*, в которой он смешивается с воздухом, поступающим через специально прорезанное около сопла окно. На конец трубы навернут наконечник с одним центральным отверстием большого диаметра или с большим числом малых отверстий

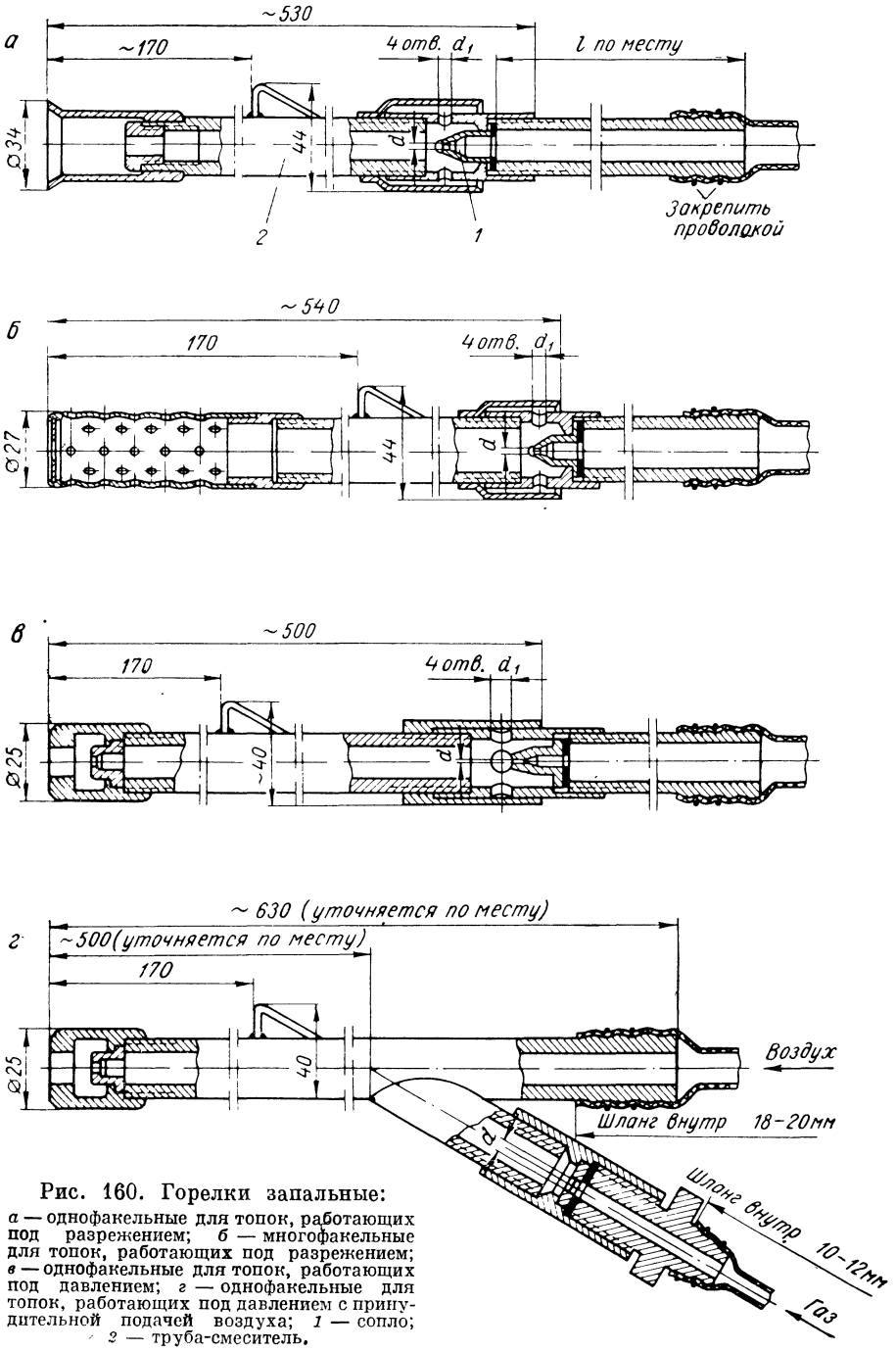


Рис. 160. Горелки запальные:

а — однофакельные для топок, работающих под разрежением; *б* — многофакельные для топок, работающих под разрежением; *в* — однофакельные для топок, работающих под давлением; *г* — однофакельные для топок, работающих под давлением с принудительной подачей воздуха; *1* — сопло; *2* — труба-смеситель.

на боковых стенках. Инжекционные запальники рассчитаны на подсос в трубу только части воздуха, необходимого для горения.

Газ подается к запальнику по гибким шлангам и трубе, служащей одновременно и рукояткой запальника. Расход запальной горелки при $Q_н^р$ = 35,6 МДж/м³ составляет от 0,2 до 1,4 м³/ч в зависимости от давления и диаметра сопла. Несложная конструкция запальника

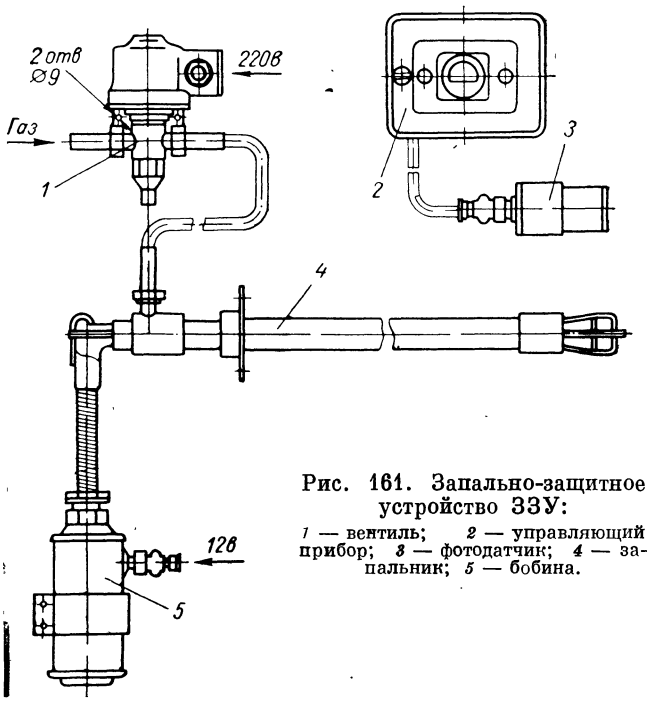


Рис. 161. Запально-защитное устройство ЗЗУ:
1 — вентиль; *2* — управляющий прибор; *3* — фотодатчик; *4* — запальник; *5* — бобина.

позволяет изготовлять его в любой мастерской. Техническая характеристика газовых переносных запальных горелок представлена в табл. 68.

Запально-защитное устройство (ЗЗУ). Для дистанционного розжига газовых горелок применяется запально-защитное устройство (ЗЗУ) (рис. 161). Входящие в комплект управляющий прибор *2* и фотодатчик *3* выполняют функции одного из элементов пусковой блокировки. В процессе работы осуществляется защита при погасании факела.

У ЗЗУ-1 бобина *5* соединяется со стволом запальника при помощи гибкого шланга, а у ЗЗУ-2 бобина закреплена на стволе запальника.

Запальник (рис. 162) включается в общую схему автоматики печи либо работает самостоятельно. Управляющий импульс одновременно открывает соленоидный клапан и подает напряжение на бобину. Образовавшееся высокое напряжение поступает на электроды запальника, возникшая искра и зажигает газ.

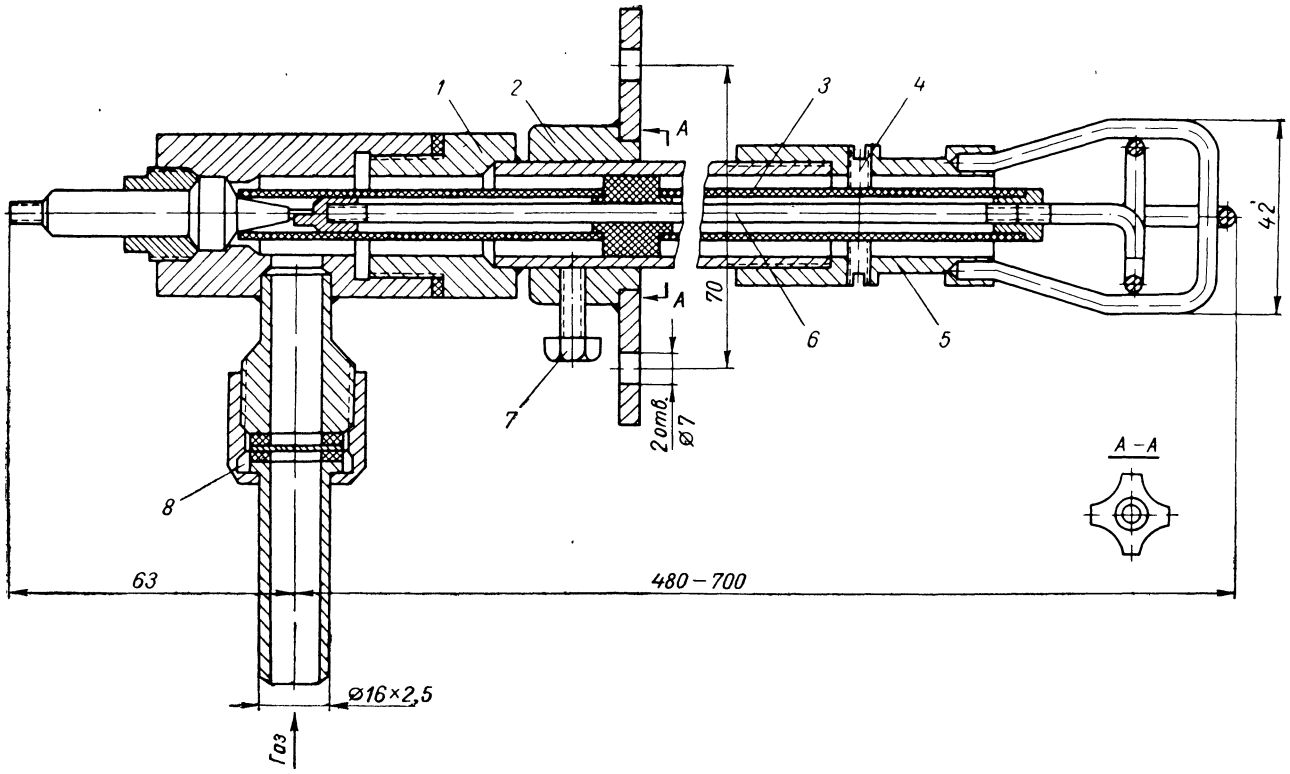


Рис. 162. Запальник:

1 — ствол; *2* — фланец; *3* — керамическая изоляция; *4* — винт для центровки; *5* — наконечник; *6* — центральный электрод; *7* — болт для фиксации запальника; *8* — дроссельная шайба.

Таблица 68

Техническая характеристика газовых переносных запальников
(см. рис. 160)

Тип горелки	Сжигаемый газ	Давление газа, кПа	Расход газа, м³/ч	Разрежение (давление) в топке, Па	Диаметр форсунки d	Диаметр отверстия инжектора d_1	Длина факела	Масса, кг
					мм			
а	Природный	0,5—5	0,38—1,00	5 ÷ —80	2,20	—	200—350	0,83
		10—100	0,4—1,0	—5 ÷ 100	1,25	10,0	200—350	—
	Сжиженный	1—5	0,15—0,25	—5 ÷ 80	1,25	—	250—400	—
		10—100	0,15—0,30	—5 ÷ 100	8,85	—	250—400	—
б	Природный	0,5—5	0,4—1,3	—5 ÷ 55	2,5	10,0	80—170	0,90
		10—100	0,3—1,4	—5 ÷ 55	1,25	5,0	60—150	—
	Сжиженный	1—5	0,35—0,75	—5 ÷ 60	2,00	8,00	80—170	—
		10—100	0,35—0,75	—5 ÷ 60	1,00	5,00	100—180	—
в	Природный	20—100	0,10—0,45	+25 ÷ —15	0,55	—	100	1,10
	Сжиженный	20—100	0,05—0,25	+25 ÷ —15	0,28	12,0	120	—
г	Природный	1—1,5	0,20—0,45	+30 ÷ —15	1,40	—	100	1,20
	Сжиженный	1—1,5	0,10—0,25	+30 ÷ —15	0,80	—	120	—

Излучение факела воспринимается фотодатчиком, в результате срабатывает выходное реле управляющего прибора. Контакты выходного реле включают клапан-отсекатель. В процессе работы печи фотодатчик осуществляет контроль за основным факелом и в случае его погасания дает команду на перекрытие газа. Газ в запальник подается через штуцер и на выходе воспламеняется от электрической искры, возникающей в зазоре между хвостовиком центрального электрода и наконечником.

Форсунки мазутные

Наиболее распространенным видом жидкого топлива, используемого в печах, топках и других огневых установках химической промышленности, является мазут, получающийся как остаток после переработки нефти.

Форсунка — основной прибор для распыления топлива, регулирования его подачи, смешения топлива с воздухом и создания определенного по форме, длине и направлению факела.

К форсункам должны предъявляться следующие требования:

1) тонкое и равномерное распыление топлива;

2) хорошее смесеобразование топлива с воздухом в самой форсунке или непосредственно за нею в фурме до выхода смеси в топочную камеру;

3) тонкое и легкое регулирование расхода топлива с сохранением заданного пропорционирования топливо — воздух и максимальным использованием энергии распылителя во все периоды регулирования;

4) устойчивый факел заданной формы и длины;

5) прочность и простота конструкции;

6) надежность и удобство эксплуатации; отсутствие подтеков, незасоряемость; удобство управления и регулирования и удобство ремонтов, осмотров и чисток, несложный монтаж.

Классификация форсунок. Все форсунки по основным конструктивным признакам и по способу распыления делятся на четыре группы:

1) механические — непосредственного распыления топлива;

2) высокого давления — с распыливающей средой высокого давления (пар, компрессорный воздух);

3) низкого давления — с распылением вентиляторным или эжекторным воздухом;

4) комбинированные, преимущественно газомазутные.

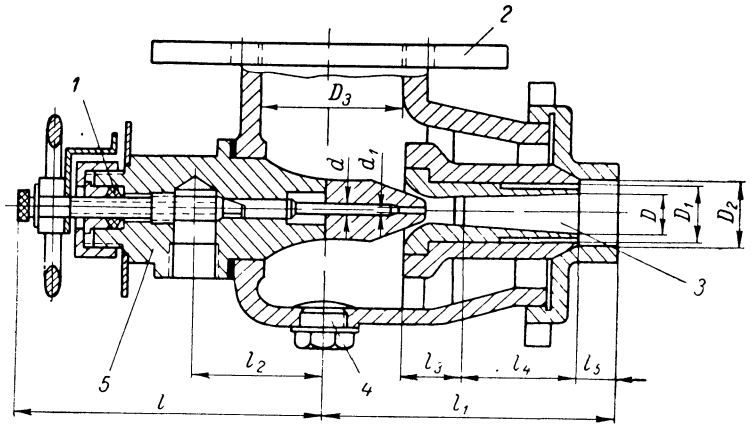


Рис. 163. Форсунка ФДМ:
1 — войлочная набивка; *2* — корпус; *3* — диффузор; *4* — отверстие для спуска мазута; *5* — распылитель.

В печах и топках используются в основном форсунки низкого давления с распылением вентиляторным воздухом. Эти форсунки работают при малых скоростях распылителя 50—75 м/с и при большом его объеме. В качестве распылителя в них используют только воздух давлением от 3 до 6 кПа. Количество воздуха для распыления составляет до 100% от теоретически рассчитанного для горения. Абсолютное давление мазута составляет 147—245 кПа.

Конструкции наиболее удачных форсунок низкого давления, рекомендуемые для установки на печах и топках, рассматриваются ниже.

Форсунка ФДМ (форсунки двухступенчатые малые) конструкции Теплопроекта приведены на рис. 163. Конструктивные размеры ее приведены в табл. 69. Характеристика форсунок ФДМ-1 и ФДМ-2 дана на рис. 164. Форсунки предназначены для сжигания мазута в небольших, чаще в опытных печах и топках. Минимальный расход мазута 1,5 кг/ч; максимальный — 9 кг/ч. Это самые маленькие форсунки. Давление мазута перед форсункой должно быть 147—196 кПа.

Расход мазута регулируют с помощью шпинделя, имеющего срез, который позволяет производить более точную регулировку.

Форсунка ФООМ (форсунка оргэнерго, одноступенчатая, модернизированная, рис. 165). Конструктивные размеры форсунки приведены в табл. 70, а производительность в табл. 71.

Минимальный расход мазута 7,5 кг/ч; максимальный — 85 кг/ч. Давление мазута перед форсункой должно быть 147—196 кПа.

Расход мазута регулируют вентилем, установленным перед форсункой, воздуха — перемещением рычажков головки форсунки.

Форсунка ФДБ (форсунка двухступенчатая большая) приведена на рис. 166. Конструктивные размеры форсунок даны в табл. 72, а производительность в табл. 73.

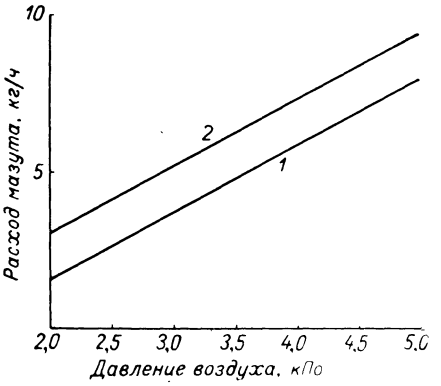


Рис. 164. Характеристика форсунки (при $\alpha = 1{,}15$):
1 — ФДМ-1; *2* — ФДМ-2.

Минимальный расход мазута 10 кг/ч, максимальный — 95 кг/ч. Расход мазута регулируют специальным краном, установленным перед форсункой, расход воздуха — задвижкой, установленной на воздухопроводе форсунки.

Таблица 69

Размеры форсунок ФДМ (в мм)

Форсунка	Давление воздуха, кПа	Производительность по мазуту, кг/ч	$Д$	$Д_1$	$Д_2$	$Д_3$	d	d_1	l	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5
ФДМ-1	3,0—5,0	1,5—4	13	20	24	50	4	2	125	120	46	22	65	18
ФДМ-2	3,0—5,0	3—8	17	24	28	60	4	2	130	135	51	30	56	19

Таблица 70

Размеры форсунки ФООМ (в мм)

Форсунка	*А*	*Б*	*В*	*Г*	*Д*	*Е*	*Ж*	*З*	*И*	*К*	*Л*	*М*	*Н*	*П*	*Р*
ФООМ-2-25	250	90	90	270	135	135	123	118	93	48	150	12	75	65	2″
ФООМ-3-30	255	105	90	297	170	125	152	139	93	74	150	12	100	90	3″
ФООМ-4-42	320	140	100	330	200	130	175	164	96	93	160	12	115	110	4″
ФООМ-5-52	340	140	120	350	220	130	197	179	96	93	160	12	140	125	5″

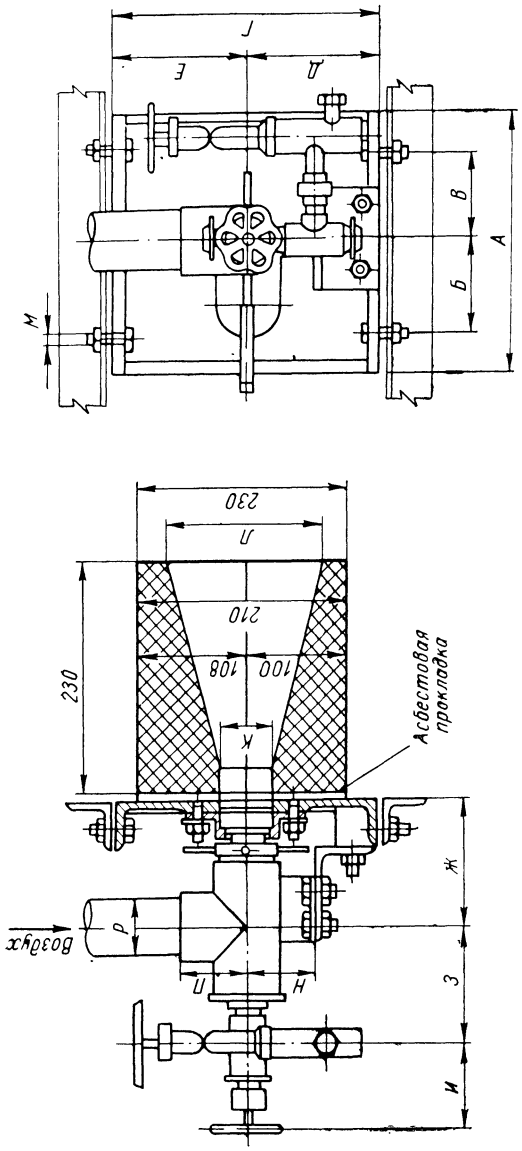


Рис. 165. Форсунка ФООМ.

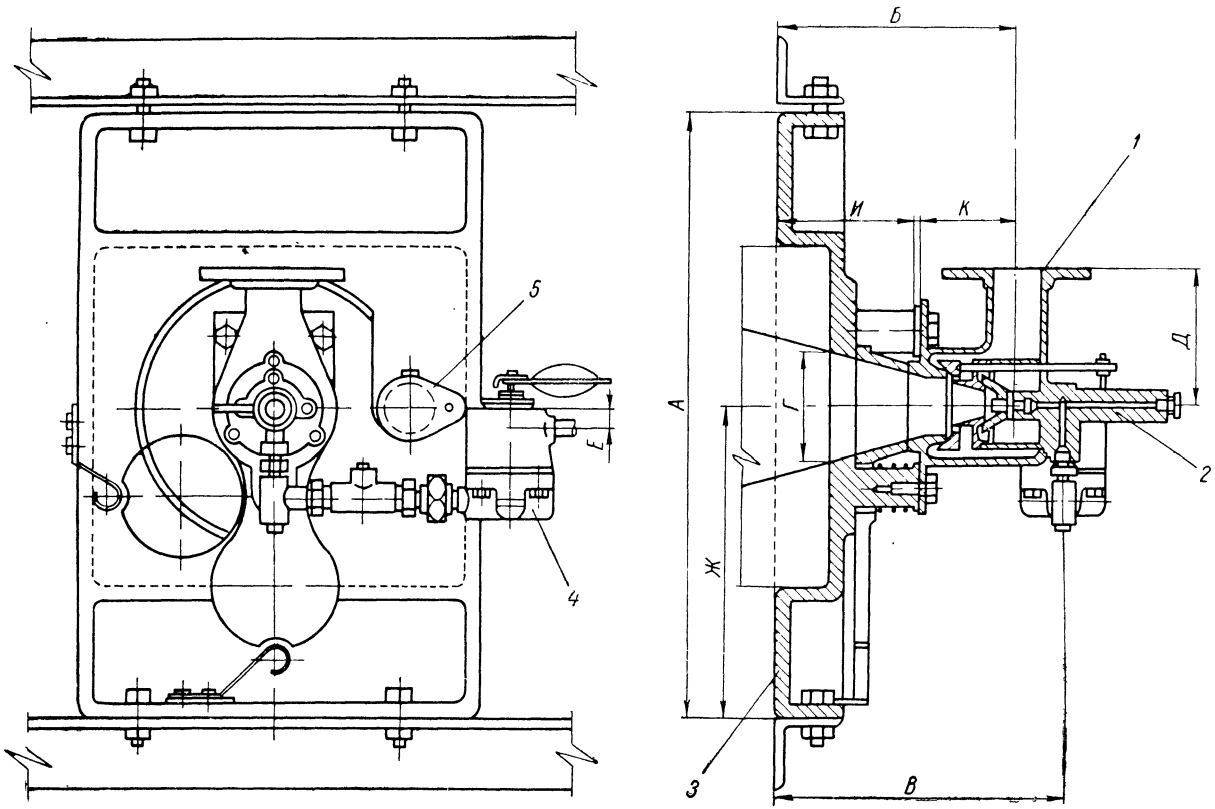


Рис. 166. Форсунка ФДБ:

1 — корпус; *2* — распылитель; *3* — плита; *4* — кран; *5* — гляделка.

Таблица 71

Производительность форсунок ФООМ (в кг/ч)

Форсунка	Давление воздуха, кПа				Форсунка	Давление воздуха, кПа			
	2,0	3,0	4,0	5,0		2,0	3,0	4,0	5,0
ФООМ-2-25	7,5	11,5	13,25	15	ФООМ-4-42	21,5	33	38	43
ФООМ-3-30	10,5	16	18,5	21	ФООМ-5-52	32,5	50	57	65
ФООМ-3-36	15	23	26,5	30	ФООМ-5-58	42,5	65	75	85

Таблица 72

Размеры форсунок ФДБ

Форсунка	*А*	*Б*	*В*	*Г*	*Д*	*Е*	*Ж*	*И*	*К*	Масса, кг
ФДБ-1	590	236	286	110	140	63	300	129	104	52
ФДБ-2	590	236	301	110	150	63	300	129	104	54
ФДБ-3	590	256	333	110	160	68	300	129	124	59
ФДБ-4	590	287	382	120	170	78	315	149	135	72

Таблица 73

Характеристики форсунок при различном давлении и максимальной производительности

Форсунка	Диаметр трубы, дюймы		Давление воздуха, Па								
			4,5			5,5		6,0		7,0	
	воздушной	мазутной	расход мазута, кг/ч	расход воздуха, м³/ч	расход мазута, кг/ч	расход воздуха, м³/ч	расход мазута, кг/ч	расход воздуха, м³/ч	расход мазута, кг/ч	расход воздуха, м³/ч	расход мазута, кг/ч
ФДБ-1	2	1/2	5,0	180	20	200	22	220	24	230	25
ФДБ-2	3	1/2	8,5	280	30	310	34	340	37	360	40
ФДБ-3	4	1/2	13,5	430	48	480	52	520	56	550	80
ФДБ-4	5	1/2	20,0	730	76	750	82	810	89	880	95

Форсунка Стальпроекта изображена на рис. 167, а ее характеристика приведена в табл. 74.

Минимальный расход мазута 3,5 кг/ч, максимальный — 205 кг/ч.

В этой форсунке поступательное перемещение сопла с наконечником осуществляют поворотом специального рычага. Диапазон регулирования производительности форсунки без заметного ухудшения распыления составляет 1 : 2—1 : 2,5. Расположение труб в форсунке по одной оси удобно в эксплуатации, так как дает возможность без разборки на шарнире выводить форсунку из печной амбразуры для осмотра, очистки и даже мелкого ремонта.

Минимальное давление мазута перед форсункой 147кПа. Форсунки Стальпроекта конструктивно разработаны лучше других форсунок этого типа и поэтому получили наибольшее распространение.

Форсунки фосфорные. Форсунка для распыления фосфора, устанавливаемая в башнях сжигания, производительностью 2500 кг/ч показана на рис. 168. Работает форсунка следующим образом:

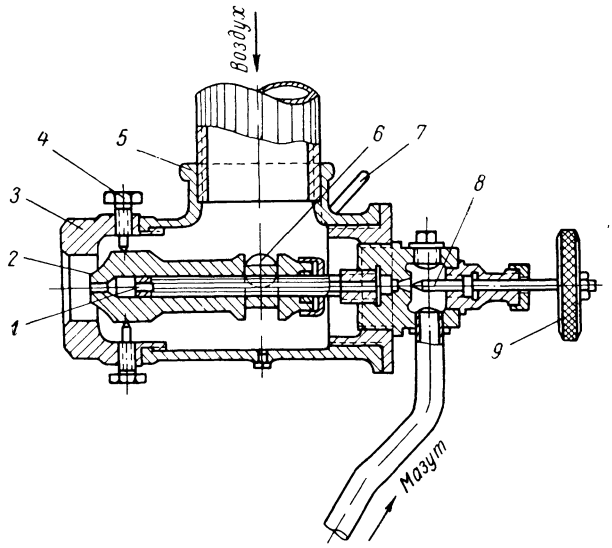


Рис. 167. Форсунка конструкции Стальпроекта:

1 — трубка неподвижная; *2* — подвижное сопло; *3* — наконечник; *4* — центрирующий винт; *5* — корпус; *6* — эксцентрик; *7* — рукоятка эксцентрика; *8* — игла для регулирования подачи мазута; *9* — маховичок регулятора подачи мазута.

по трубе *3* под давлением ~0,7 МПа подается подогретый до 75 °С воздух, а по трубе *2* под давлением ~0,3—0,4 МПа поступает расплавленный желтый фосфор с температурой 60—80 °С. Фосфор со

Таблица 74

Характеристика форсунок конструкции Стальпроекта

Внутренний диаметр воздухопровода		Производительность, кг/ч мазута при напоре воздуха		Диаметр сопел, мм		Масса, кг
дюйм	мм	3 кПа	7 кПа	мазут	воздух	
$1^1/_2$	38	3,5	8	2,5	21	4,9
$2^1/_2$	65	11	24	3.0	40	6,9
4	100	32	57	4,0	60	14,8
5	125	54	82	5,0	75	25,4
6	150	80	120	5,0	95	40,1
8	200	135	205	6.0	135	56.0

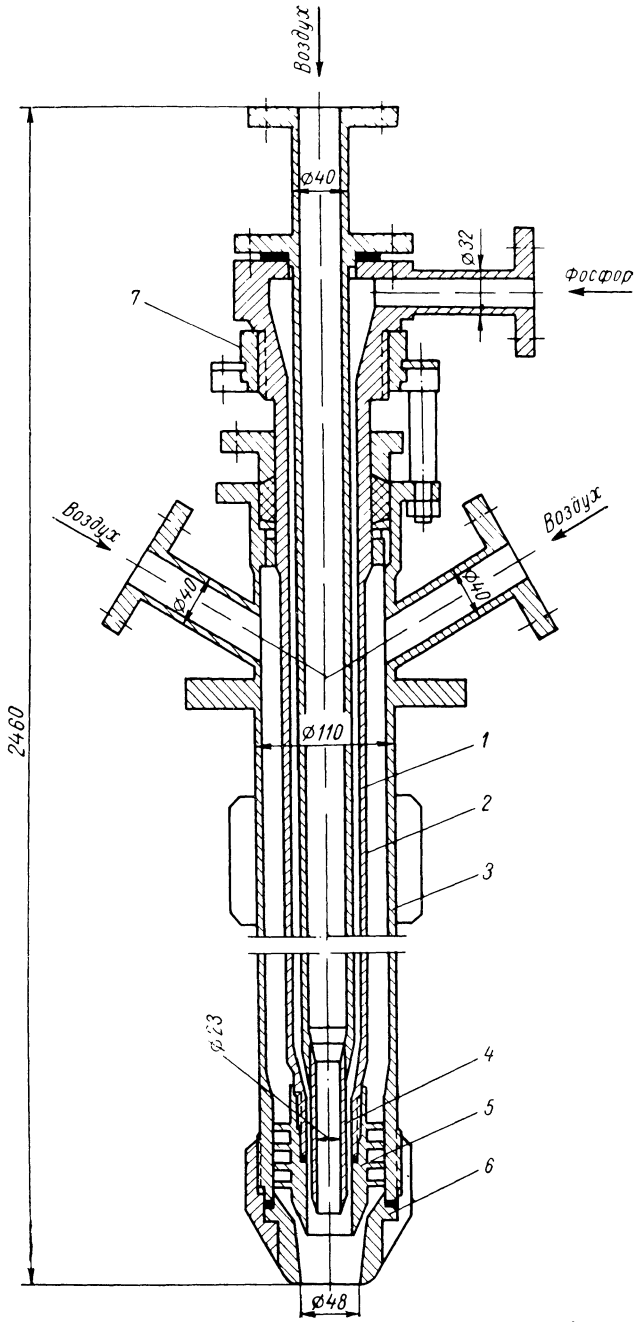


Рис. 168. Форсунка фосфорная конструкции ЛенНИИХиммаша:

1—3 — трубы; *4* и *5* — насадки; *6* — мундштук; *7* — винт для регулирования зазора.

скоростью 1,15—1,8 м/с попадает в камеру смешения, где подхватывается и распыляется воздухом, выходящим из насадки *4* и образующим факел горения. Воздух, подаваемый по трубе *3*, закручивается спиралью насадки *5* и, входя тангенциально в камеру смешения, увлекает в круговое движение частицы фосфора, вследствие чего на поверхности основной струи образуются завихрения. Эти завихрения способствуют перемешиванию диспергированных частиц фосфора с воздухом, ускоряя горение и укорачивая длину факела.

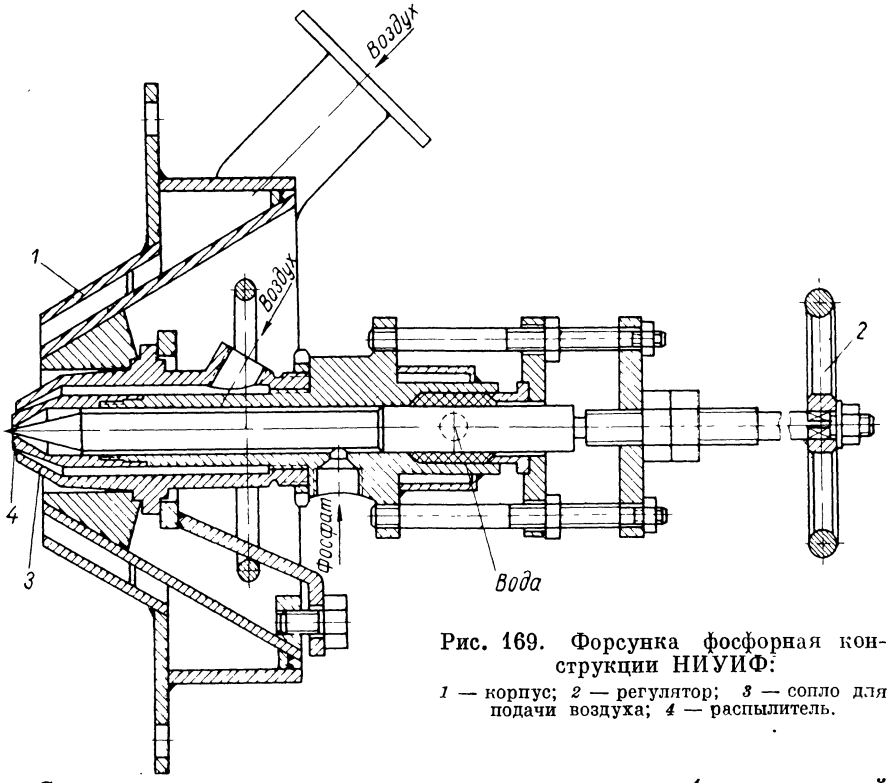


Рис. 169. Форсунка фосфорная конструкции НИУИФ:
1 — корпус; *2* — регулятор; *3* — сопло для подачи воздуха; *4* — распылитель.

Скорость сжатого воздуха на выходе из насадки *4* регулируемой щели составляет соответственно 150 и 170 м/с. Производительность форсунки регулируется вентилями, которые должны быть установлены на линиях подачи воздуха и фосфора в непосредственной близости от форсунки.

Простота наладки форсунки и широкие возможности регулировки на ходу делают ее удобной и маневренной в эксплуатации.

Количество воздуха, подаваемое через форсунки на горение, только 8,5% от теоретически рассчитанного и составляет 1740 м³/ч. В форсунку воздух подается раздельно по 50% в центральную и в кольцевую трубы.

Для сжигания фосфора в малых количествах применяются охлаждаемые форсунки конструкции НИУИФ (рис. 169). Производительность этой форсунки 60 кг/ч.

Форсунки серные. Форсунки для распыления расплавленной серы могут быть использованы только при применении чистой серы (99,999% серы). Наличие пустой породы даже в ничтожном количестве приводит к засорению форсунки и остановке системы. Форсунки для распыления расплавленной серы воздухом изображены на рис. 170, 171. Рабочее давление в форсунке создается путем установки сероплавилки на 4—5 м выше форсунок; давление воздуха 700 кПа. Производительность форсунок от 12 до 50 т/сутки.

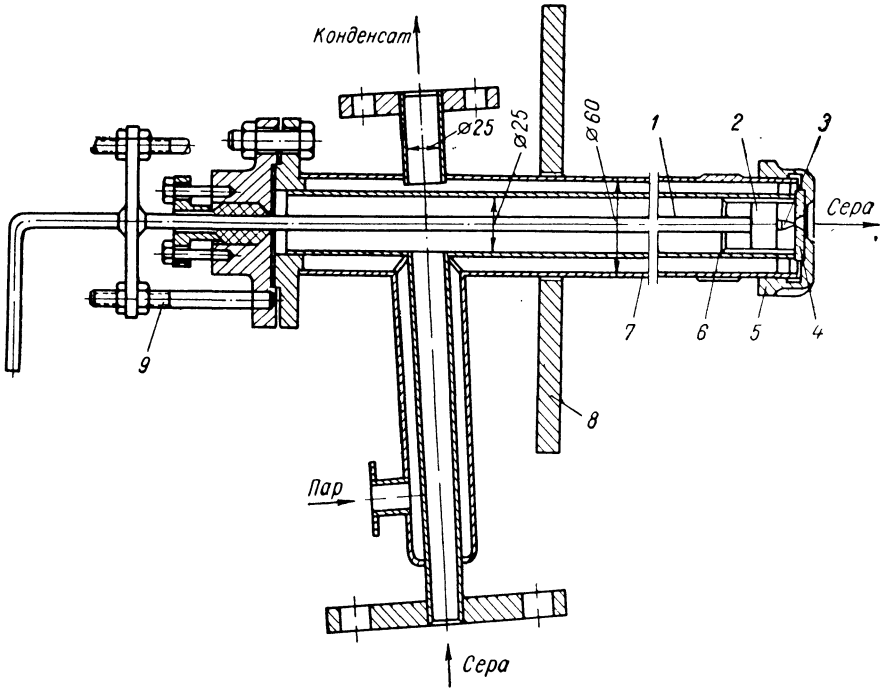


Рис. 170. Форсунка серная механическая:

1 — центральный вал; *2* — спираль для создания вращательного движения потока; *3* — игольчатый клапан; *4* — диафрагма; *5* — колпачковая гайка для стягивания диафрагмы; *6* — трубка для подачи серы; *7* — кожух для обогрева паром; *8* — фланец печи; *9* — шпильки с гайками для перемещения центрального вала.

Форсунки сырьевые. Сырьем в производстве сажи служат следующие вещества:

зеленое масло — керосино-газойлевая фракция (190—360 °С) продуктов пиролиза крекинг-керосина;

термогазойль — газойлевая фракция (200—460 °С) термического крекинга газойлей каталитического крекинга и фенольных экстрактов масляных дистилляторов;

экстракты каталитических газойлей — получаемые из газойля каталитического крекинга на экстракционных установках;

антраценовое масло — является продуктом переработки каменноугольной смолы высокотемпературного коксования каменных углей;

пековый дистиллят — получают при окислении каменноугольного пека и его коксовании.

Указанные вещества должны быть поданы в реакционные камеры печей в распыленном виде в форсунках. По особенностям конструкции их можно разделить на два типа:

1) форсунки, устанавливаемые в циклонные печи;

2) форсунки, устанавливаемые в цилиндрические печи.

Форсунка для распыливания сырья в циклонной печи. Форсунка распыливает сырье воздухом, подаваемым под давлением 0,6—0,8 МПа

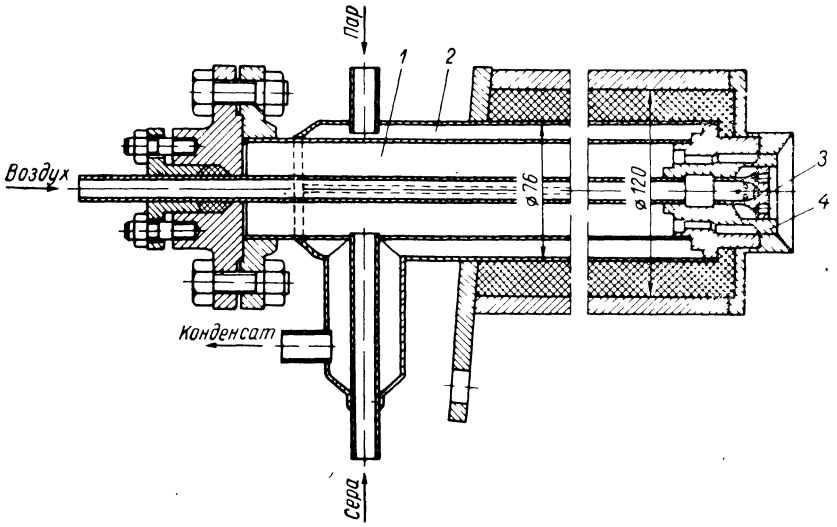


Рис. 171. Форсунка серная механическая:
1 — труба для серы; *2* — паровая рубашка; *3* — распылитель для воздуха; *4* — распылитель для серы.

на закрученный поток раскаленных газов от сжигания газового или жидкого топлива. Форсунка (рис. 172) состоит из двух концентрично расположенных стальных труб. Сырье подается через внутреннюю трубу на распылитель, установленный на его конце. Воздух на распыливание подается по внешней трубе, которая оканчивается соплом. Форсунка с помощью фланца крепится к торцевой стенке циклонной печи.

Хорошее распыливание сырья производится при скорости воздуха в сопле 100 м/с, выходное отверстие сопла в зависимости от производительности форсунки имеет диаметр 5—6 мм, при этом диаметр распыленного сырья равен 30—40 мкм.

Форсунка для распыливания сырья в цилиндрической печи. Форсунка (рис. 173) распыливает сырье воздухом, но необходимый для горения сырья воздух также подается в нее. Форсунка выполнена из трех концентрично расположенных труб. Через центральную трубу подается сырье, через вторую — воздух на распыливание, а через внешнюю — воздух на горение. Внешняя труба является корпусом

форсунки, на котором имеется фланец для крепления к печи. Выходящее из сопла сырье воспламеняется, но из-за недостатка воздуха капли его не сгорают, а только газифицируются. В результате в центральной части факела образуется нагретая смесь испаренного сырья и продуктов разложения и неполного горения водорода, окиси углерода, двуокиси углерода и паров воды.

Рекуператоры. Для использования тепла отходящих газов от печей применяют рекуператоры. По конструкции их можно разделить на трубчатые, радиационные, керамические и др.

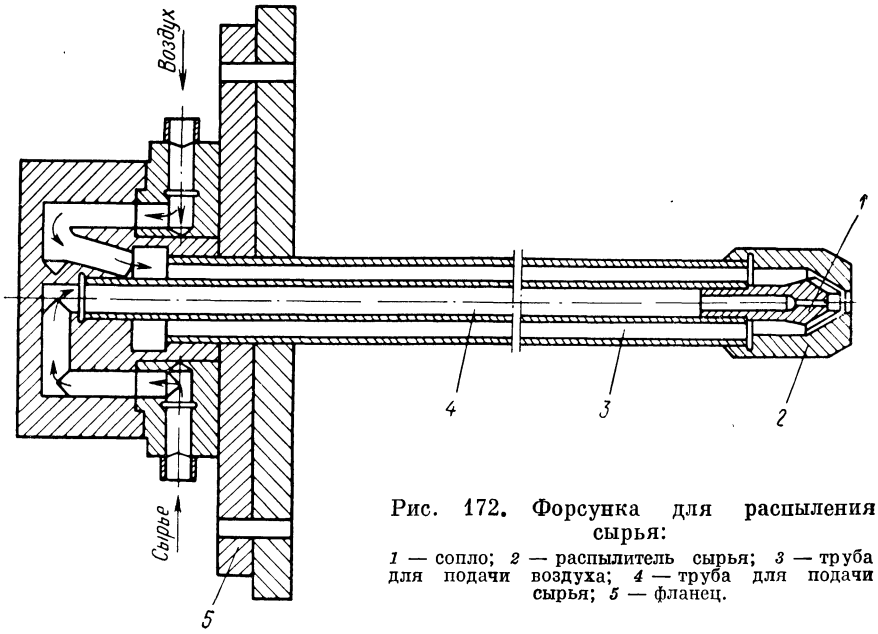


Рис. 172. Форсунка для распыления сырья:
1 — сопло; *2* — распылитель сырья; *3* — труба для подачи воздуха; *4* — труба для подачи сырья; *5* — фланец.

Примером трубчатого рекуператора может служить рекуператор содовой печи (рис. 17). Дымовые газы перед выбросом в атмосферу проходят трубчатый рекуператор, установленный на разгрузочной головке содовой печи. Рекуператор двухходовой. Количество дымовых газов, поступающих в него, регулируется поворотными заслонками. Нагретый воздух от рекуператора направляется в горелку.

Радиационный рекуператор (рис. 10) установлен после муфельной сульфатсоляной печи, где отходящие газы, имеющие высокую температуру, проходят через трубу, которая и является рекуператором, отдают свое тепло и выбрасываются в атмосферу. Нагретый воздух подается в горелки печи.

Керамический рекуператор (рис. 29) установлен на ретортной печи для получения термоантрацита. Применение керамических рекуператоров вызвано необходимостью использования тепла отходящих газов, имеющих высокую температуру. Рекуператор собирают из отдельных фасонных элементов (камней), изготовленных из шамота. Нагретый воздух в рекуператорах используется в горелках

печи. При расчете керамических рекуператоров скорость воздуха принимается равной 1—2 м/с, а дымовых газов 0,3—1,0 м/с. Недостатком керамических рекуператоров является плохая герметизация воздушного и дымового трактов. Подсос нагретого воздуха с воздушного тракта достигает 30%.

Трубопроводы. О б щ и е с в е д е н и я. Современные печи химической промышленности снабжены системой трубопроводов различного технологического назначения, обеспечивающих транспортирование к приборам сжигания горючего материала, воздуха, азота

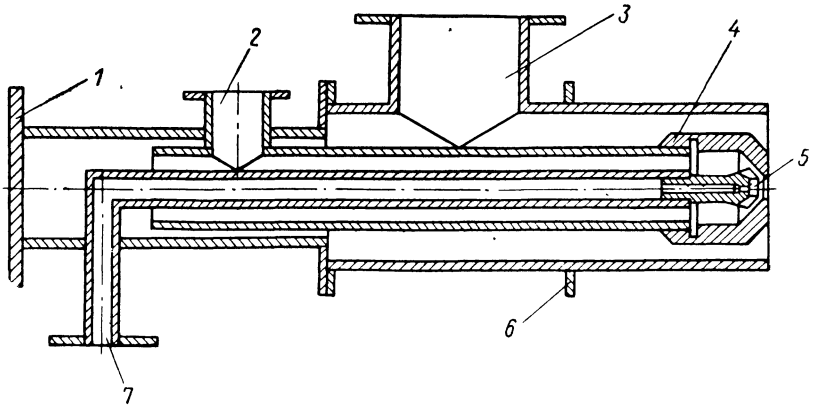


Рис. 173. Форсунка для распыления сырья:
1 — корпус; *2* — патрубок для подачи распыливающего воздуха; *3* — патрубок для подачи воздуха на горение; *4* — распылитель сырья; *5* — сопло; *6* — фланец; *7* — патрубок для подачи сырья.

и отвода из печи продуктов сжигания. Трубопроводы печей можно разделить на следующие виды: газо-, мазуто-, серо-, фосфоро- и паропроводы.

Газопроводы служат для транспортирования горючего газа, воздуха, азота и дымовых газов. При проектировании и сооружении газопроводов для горючих газов следует руководствоваться соответствующими директивными материалами Госстроя СССР и Госгортехнадзора РСФСР. Особое внимание необходимо уделять разработке рациональной, удобной и безопасной в эксплуатации схеме, которая должна быть по возможности простой, компактной и экономичной. При определении диаметров газовых коммуникаций на печах исходят из следующих скоростей газа (в м/с):

В распределительных газопроводах	10—12
В отводах к горелкам	5—7

При расчете газопроводов среднего давления скорость газа может быть принята 25—30 м/с и выше в зависимости от имеющегося исходного и требуемого рабочего давления перед горелкой.

Очищенные от взвешенных частиц горючие газы (природный, генераторный, печной) с низкой температурой обычно транспортируют

по не футерованным металлическим трубам. Неочищенный генераторный газ с температурой выше 300 °С транспортируют по металлическим газопроводам, футерованным огнеупорным кирпичом.

Особое внимание необходимо уделять при проектировании, эксплуатации и ремонту трубопроводов, по которому транспортируется печной газ от фосфорных печей. Печной газ состоит в основном из 80% окиси углерода, содержит также элементарный фосфор до 8%, фосфористый водород, сероводород, а также пыль. Газ характеризуется большой токсичностью, взрывоопасен и из-за присутствия фосфора и фосфористого водорода самовоспламеняется. При проектировании газопровода печного газа для безопасной эксплуатации необходимо выполнить следующее:

1. Газопровод всегда должен находиться под избыточным давлением 30 Па.

2. Должна быть обеспечена плотность системы.

3. Продувка газопроводов и агрегатов, в которых производится сжигание печного газа, должна производиться только инертным газом (азотом).

4. Запорная арматура на газопроводах должна дублироваться гидравлическими затворами с высотой столба жидкости, превышающей в 1,5 раза рабочее давление. Для поддержания постоянного уровня воды в затворах должны быть подводящая и переливная трубы.

5. К трубопроводам печного газа должны быть подведены горячая вода (80 °С) и пар. При разборке системы необходимо продуть газопроводы инертным газом для удаления печного газа, пропарить для разогревания элементарного фосфора, осевшего на стыках труб, промыть горячей водой для удаления фосфора и тем самым предупредить самовоспламенение фосфора в трубах при поступлении воздуха и промыть холодной водой до полного охлаждения.

6. Газопроводы укладываются пилой с уклоном 2—4%. Конденсат содержит частички элементарного фосфора и поэтому в низших точках трубопровода патрубки должны быть соединены со сборником конденсата, где наряду со стоком конденсата скапливается элементарный фосфор в конусообразной обогреваемой части и периодически откачивается или на станцию нейтрализации, или сливается в специальный монжус с водой.

7. Розжиг горелок, работающих на печном газе, производится запальниками для природного газа. Розжиг на печном газе запрещен.

8. Автоматическая отсечка печного газа производится специальным отсечным клапаном (рис. 174), снабженным электромагнитом и обогреваемым водяной рубашкой. Сразу после отсечки печного газа система автоматически заполняется инертным газом.

Для безопасной эксплуатации печей и топок, отапливаемых природным газом, можно рекомендовать следующие схемы газоснабжения печи (с учетом применяемой арматуры, типа газовых горелок и давления газа):

1) на печах и топках, оборудованных дутьевыми горелками низкого или среднего давления и отключающими устройствами-задвижками, рис. 175;

2) на печах и топках, оборудованных дутьевыми горелками среднего давления и отключающими устройствами-кранами, рис. 176;

3) на печах и топках, оборудованных дутьевыми горелками низкого давления и отключающими устройствами-кранами, рис. 177;

4) на печах и топках, оборудованных инжекционными горелками среднего давления и отключающими устройствами-задвижками, рис. 178;

5) на печах и топках, оборудованных инжекционными горелками среднего давления и отключающими устройствами-кранами, рис. 179.

Учитывая особенности печного газа, описанные ранее, может быть рекомендована схема обвязочных газопроводов печей и топок, показанная на рис. 180. Трубопроводы печного газа должны быть изолированы для предотвращения конденсации печного газа.

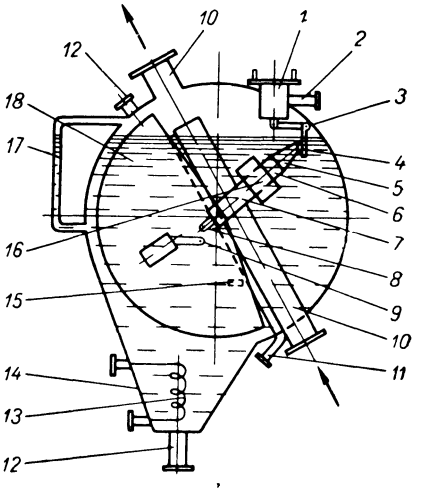


Рис. 174. Отсечной клапан для печного газа от фосфорных печей:
1 — электромагнит; *2* — штуцер; *3* и *6* — оси; *4* — защелка; *5* — собачка; *7* — рычаг; *8* — палец; *9* — конечный выключатель; *10* — газоход; *11* — переливной патрубок; *12* — патрубок; *13* — змеевик; *14* — корпус; *15* — упор; *16* — груз; *17* — водомерная трубка; *18* — пластина.

Воздухопроводы служат для подачи воздуха на горение, а также для охлаждения печей и химических продуктов до необходимых температур. Их обычно делают сварными из 3-миллиметрового стального листа.

При небольшом подогреве воздуха требуется наружная изоляция воздухопроводов. В случае подогрева воздуха выше 400 °С воздухопроводы футеруют и изолируют изнутри. Скорость (в м/с) в воздухопроводах принимается следующая:

В распределительных воздухопроводах . . .	10—12
В отводах к горелкам	5—7

Азотопроводы служат для подачи азота как инертного газа к печам фосфорного производства, трубопроводам и другому оборудованию для заполнения в случае отключения печного газа с целью предотвращения самовоспламенения отложившегося фосфора на их стенках при поступлении кислорода воздуха. Скорость в азотопроводах принимается 10 м/с. Для азотопроводов используются водогазопроводные трубы из углеродистой стали.

Дымовые газы обычно отводят от печей по кирпичным каналам-боровам. Если боровов нет, то их транспортируют по трубопроводам, сваренным из листовой стали толщиной 4 мм. При невысокой температуре дымовых газов необходима наружная изоляция, трубопроводы, по которым транспортируются дымовые газы с температурой

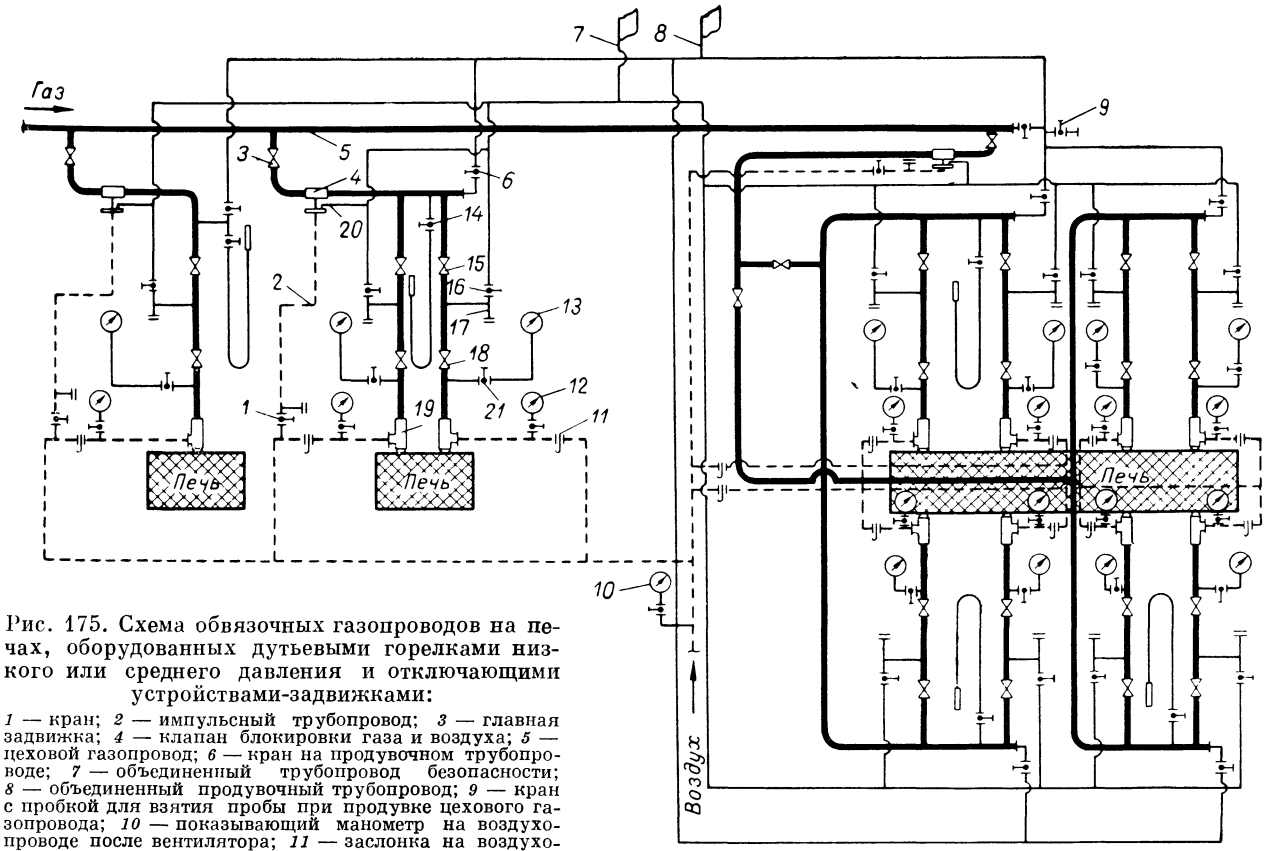


Рис. 175. Схема обвязочных газопроводов на печах, оборудованных дутьевыми горелками низкого или среднего давления и отключающими устройствами-задвижками:

1 — кран; *2* — импульсный трубопровод; *3* — главная задвижка; *4* — клапан блокировки газа и воздуха; *5* — цеховой газопровод; *6* — кран на продувочном трубопроводе; *7* — объединенный трубопровод безопасности; *8* — объединенный продувочный трубопровод; *9* — кран с пробкой для взятия пробы при продувке цехового газопровода; *10* — показывающий манометр на воздухопроводе после вентилятора; *11* — заслонка на воздухопроводе; *12* — показывающий манометр на воздухопро , воде; *13* — показывающий манометр на газопроводе; *14* — кран на штуцере к запальнику; *15* — контрольный кран; *16* — кран на трубопроводе безопасности; *17* — штуцер с пробкой; *18* — рабочая задвижка; *19* — дутьевая горелка; *20* — сборный трубопровод; *21* — кран на штуцере к манометру.

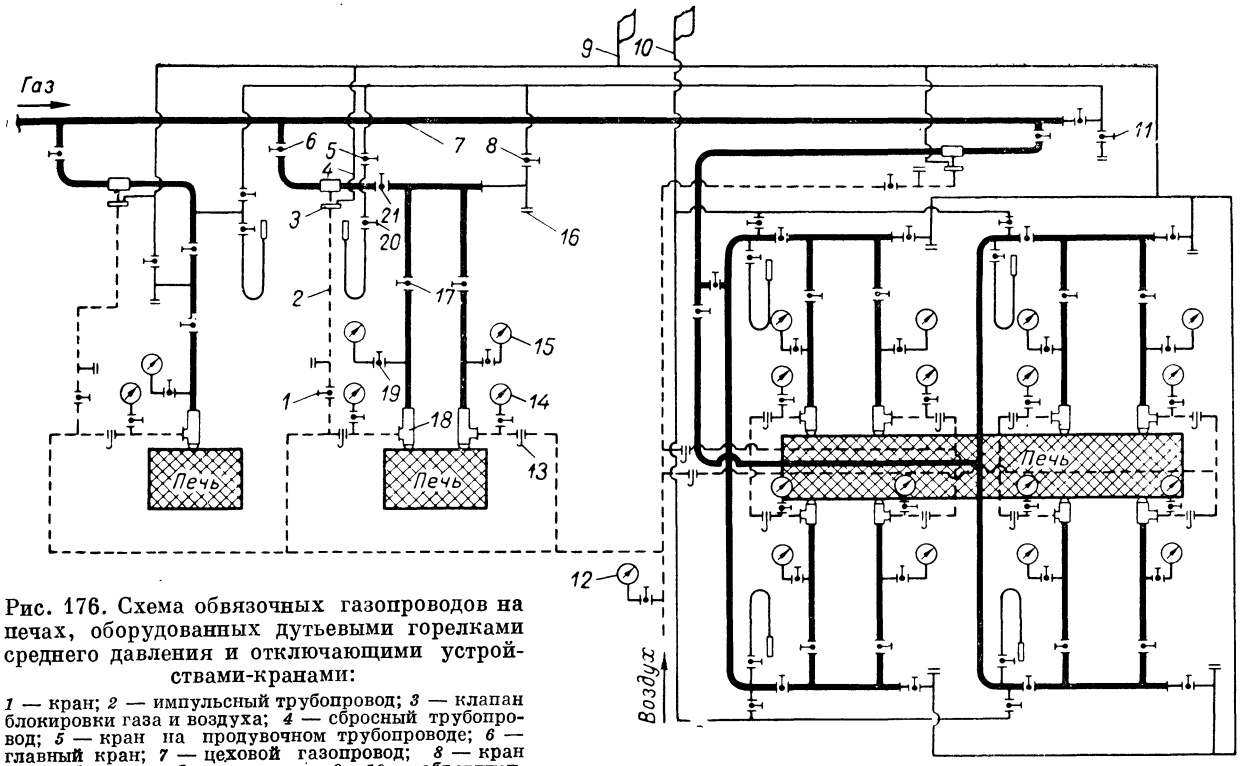


Рис. 176. Схема обвязочных газопроводов на печах, оборудованных дутьевыми горелками среднего давления и отключающими устройствами-кранами:

1 — кран; *2* — импульсный трубопровод; *3* — клапан блокировки газа и воздуха; *4* — сбросный трубопровод; *5* — кран на продувочном трубопроводе; *6* — главный кран; *7* — цеховой газопровод; *8* — кран на трубопроводе безопасности; *9* и *10* — объединенные трубопроводы безопасности; *11* — кран с пробкой для взятия пробы при продувке цехового газопровода; *12* — показывающий манометр на воздухопроводе после вентилятора; *13* — заслонка на воздухопроводе; *14* — показывающий манометр на воздухопроводе; *15* — показывающий манометр на газопроводе; *16* — штуцер с пробкой; *17* — рабочий кран; *18* — дутьевая горелка; *19* — кран на штуцере к манометру; *20* — кран на штуцере к запальнику; *21* — контрольный кран.

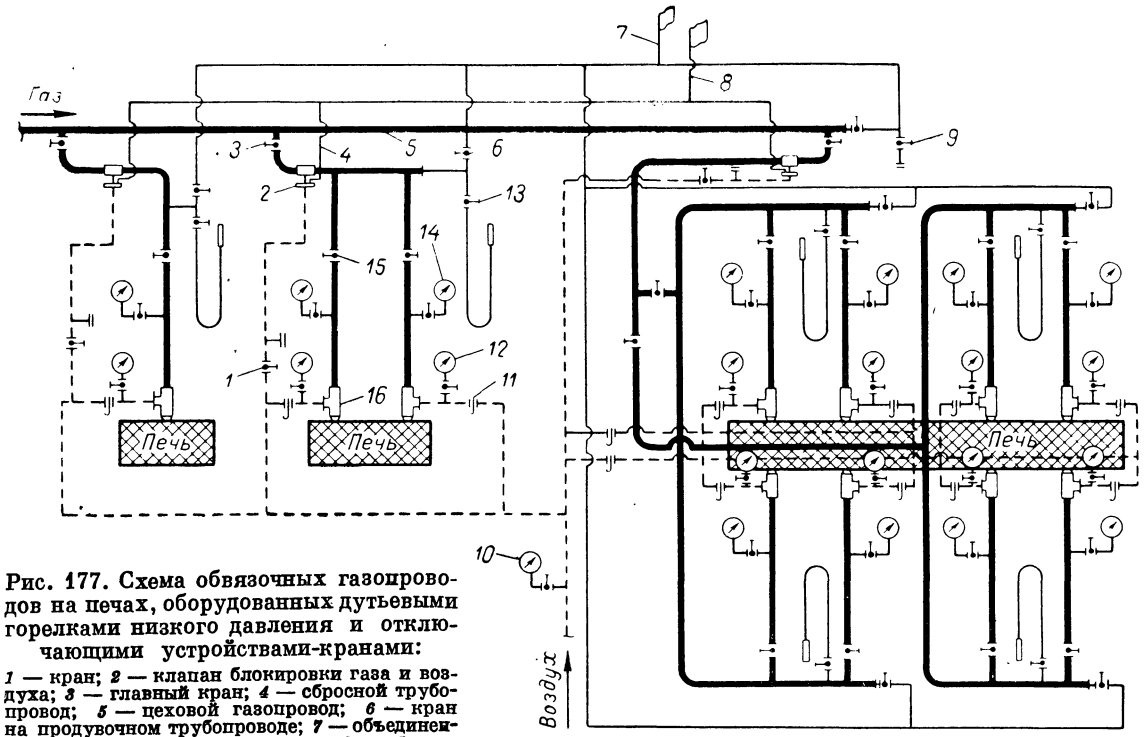


Рис. 177. Схема обвязочных газопроводов на печах, оборудованных дутьевыми горелками низкого давления и отключающими устройствами-кранами:

1 — кран; *2* — клапан блокировки газа и воздуха; *3* — главный кран; *4* — сбросной трубопровод; *5* — цеховой газопровод; *6* — кран на продувочном трубопроводе; *7* — объединенный продувочный трубопровод; *8* — объединенный сбросной трубопровод; *9* — кран с пробкой для взятия пробы при продувке газопровода; *10* — показывающий манометр на воздухопроводе после вентилятора; *11* — заслонка на воздухопроводе; *12* — показывающий манометр на воздухопроводе; *13* — кран на штуцере к запальнику; *14* — показывающий манометр на газопроводе; *15* — рабочий кран; *16* — дутьевая горелка.

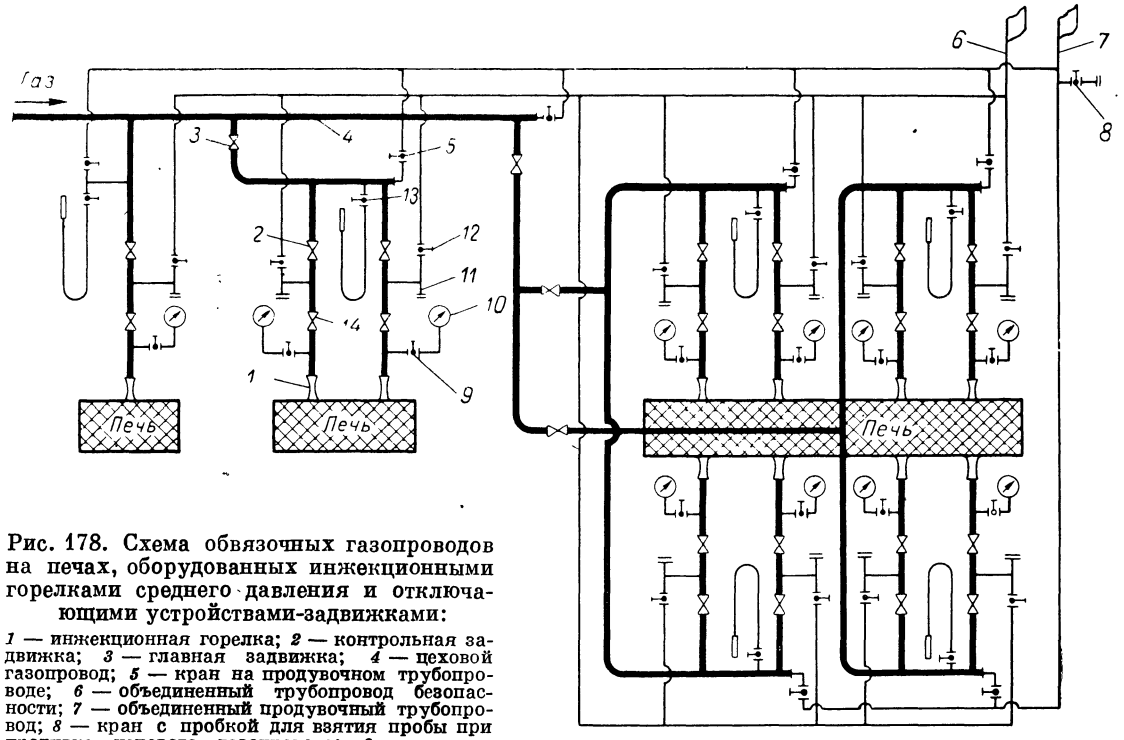


Рис. 178. Схема обвязочных газопроводов на печах, оборудованных инжекционными горелками среднего давления и отключающими устройствами-задвижками:

1 — инжекционная горелка; *2* — контрольная задвижка; *3* — главная задвижка; *4* — цеховой газопровод; *5* — кран на продувочном трубопроводе; *6* — объединенный трубопровод безопасности; *7* — объединенный продувочный трубопровод; *8* — кран с пробкой для взятия пробы при продувке цехового газопровода; *9* — кран на штуцере к манометру; *10* — показывающий манометр; *11* — штуцер с пробкой; *12* — кран на трубопроводе безопасности; *13* — кран на штуцере к запальнику; *14* — рабочая задвижка.

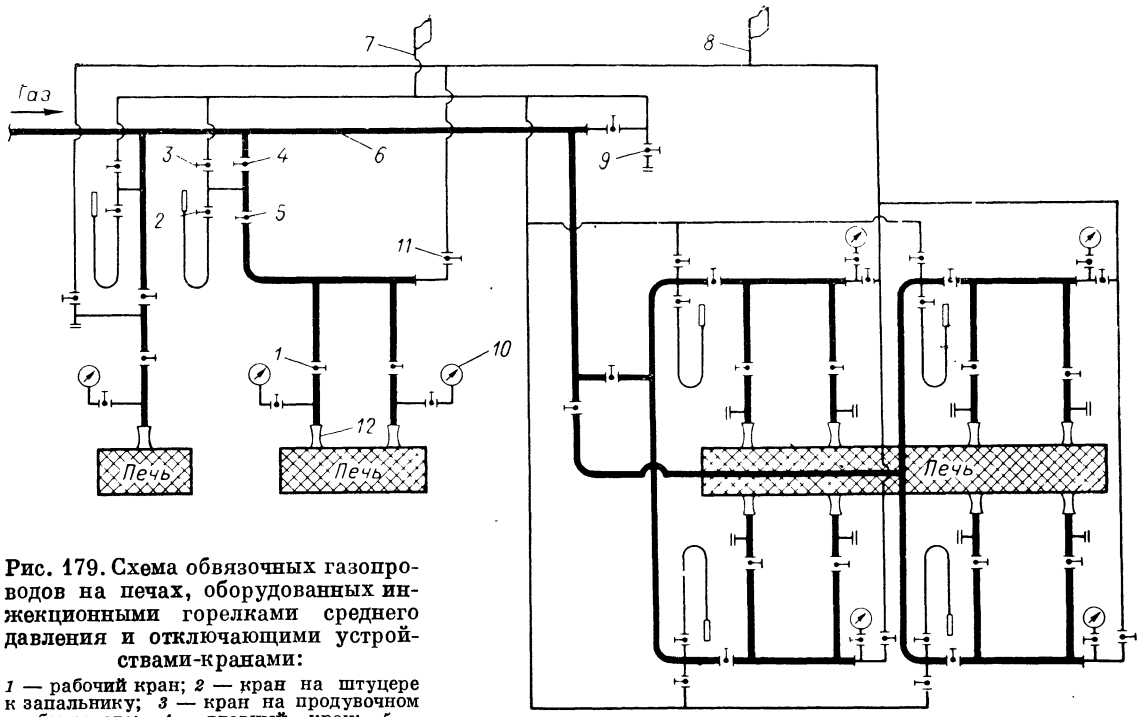


Рис. 179. Схема обвязочных газопроводов на печах, оборудованных инжекционными горелками среднего давления и отключающими устройствами-кранами:

1 — рабочий кран; *2* — кран на штуцере к запальнику; *3* — кран на продувочном трубопроводе; *4* — главный кран; *5* — контрольный кран; *6* — цеховой газопровод; *7* — объединенный продувочный газопровод; *8* — объединенный трубопровод безопасности; *9* — кран с пробкой для взятия пробы при продувке цехового газопровода; *10* — показывающий манометр; *11* — кран на трубопроводе безопасности; *12* — инжекционная горелка.

свыше 400 °С, теплоизолируются изнутри. Скорость дымовых газов в трубопроводах в зависимости от температуры и тяговых устройств принимается 3—10 м/с.

Мазутопроводы предназначены для подачи мазута к форсункам печи. Для хорошей работы мазутных топок необходимо обеспечить

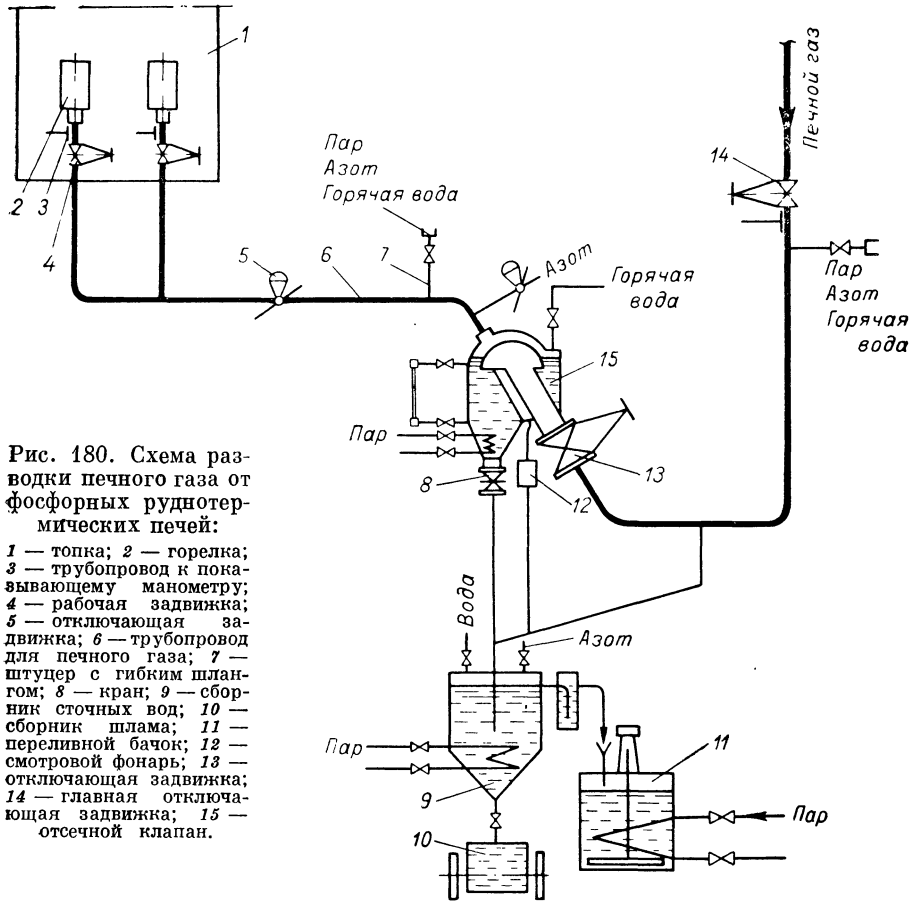


Рис. 180. Схема разводки печного газа от фосфорных руднотермических печей:

1 — топка; *2* — горелка; *3* — трубопровод к показывающему манометру; *4* — рабочая задвижка; *5* — отключающая задвижка; *6* — трубопровод для печного газа; *7* — штуцер с гибким шлангом; *8* — кран; *9* — сборник сточных вод; *10* — сборник шлама; *11* — переливной бачок; *12* — смотровой фонарь; *13* — отключающая задвижка; *14* — главная отключающая задвижка; *15* — отсечной клапан.

минимальное обводнение мазута, хороший подогрев его, фильтрование, а также поддержание определенных параметров (давления, вязкости). Предварительная подготовка мазута для сжигания проводится в мазутохранилищах.

Подогревание мазута только в мазутохранилищах недостаточно, так как он может охладиться в трубопроводах и поступить к форсункам холодным. Особенно велика опасность охлаждения мазута при перерывах в работе, когда прекращается циркуляция его в отдельных ветвях мазутопровода. Наилучшей схемой мазутопроводов следует считать циркуляционную схему, когда мазут постоянно циркулирует по кольцевому мазутопроводу. При этом его количество

в 3—4 раза превышает потребность. Для нагревания мазута до 70—80 °С все мазутопроводы вплоть до форсунок должны постоянно подогреваться с помощью паропровода (парового «спутника»), заключенного в одну общую изоляцию с мазутопроводом (рис. 181). Для пара должен быть предусмотрен надежный отвод через конденсационный горшок, шайбу или кран, чтобы конденсат не застаивался в ответвлениях.

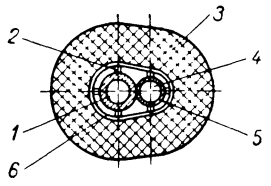


Рис. 181. Схема обогрева и теплоизоляции мазутопровода:

1 — мазутопровод; *2* — деревянная рейка; *3* — теплоизоляция; *4* — паропровод; *5* — муфта; *6* — листовая сталь.

Фильтрование мазута необходимо для всех печей, чтобы обеспечить четкую и бесперебойную работу форсунок при любых нагрузках. На рис. 182 показана конструкция малого фильтра, устанавливаемого перед отдельными форсунками. На рис. 183 изображен пластинчатый фильтр для мазута ФП-1 оригинальной конструкции. Фильтр служит для окончательной тонкой очистки мазута и требует установки предвключенного сетчатого фильтра.

Схема разводки мазута приведена на рис. 184. Скорость в мазутопроводах принимается 0,5—1,0 м/с.

Серопроводы предназначены для транспортирования расплавленной серы от сероплавилки к форсункам печей для сжигания и в реакторы сероуглеродных печей. Сера обладает наибольшей текучестью при 140—150 °С. Поэтому серопроводы снабжают рубашкой и обогревают паром под давлением 600 кПа. При этом температура стенки будет 145—150 °С, что обеспечит оптимальную текучесть серы.

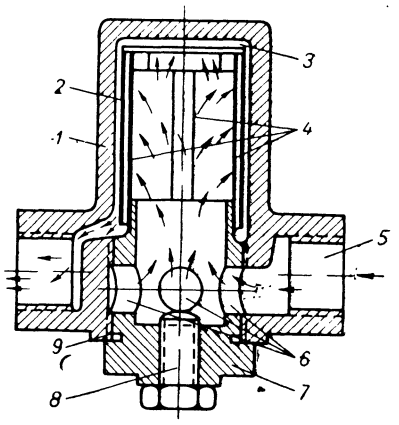


Рис. 182. Малый фильтр:

1 — корпус; *2* — цилиндрическая сетка; *3* — пространство прохода мазута; *4* — стойки; *5* — штуцер для входа мазута; *6* — проходные отверстия; *7* — пробка; *8* — винт; *9* — резьба.

Подвод пара осуществляется таким образом, чтобы можно было выключить обогрев серопровода на отдельных участках без отключения пара на остальные участки и аппараты. Для предотвращения застоев конденсат отводят раздельно от каждого аппарата и от небольших участков серопровода в общий конденсатопровод.

Серопровод монтируется исключительно на фланцевых соединениях; на рис. 185 показан узел присоединения серопровода с обводной перемычкой, которую надлежит приварить к обогреваемой рубашке в горизонтальной плоскости к серопроводу.

Серопровод обязательно теплоизолируют и укладывают под уклоном 1 : 500; это способствует опорожнению его во время вынужденных остановок и при ремонте. Серопроводы не должны провисать. Из-

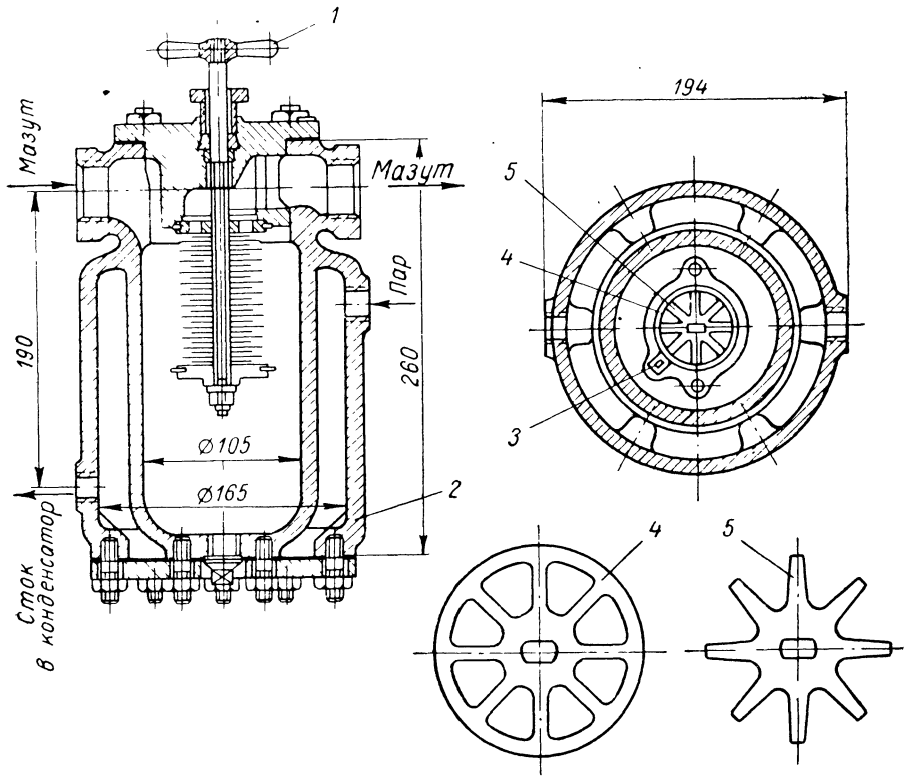


Рис. 183. Пластинчатый фильтр для мазута ФП-1:

1 — рукоятка; *2* — корпус; *3* — неподвижные скребки; *4* — пластина; *5* — прокладка

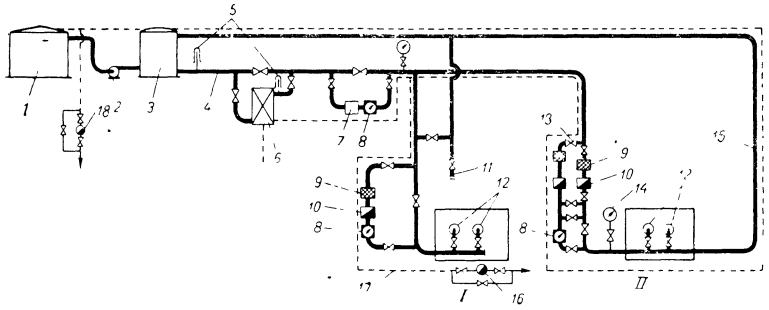


Рис. 184. Схема цехового мазутопровода:

I — тупиковая система подачи мазута; *II* — циркуляционная система подачи мазута; *1* — заводское мазутохранилище; *2* — насос для подачи мазута; *3* — цеховые баки; *4* — мазутопровод; *5* — термометры; *6* — мазутоподогреватель; *7* — регулятор давления; *8* — расходомер; *9* — сетчатый фильтр; *10* — пластинчатый фильтр; *11* — сливной патрубок; *12* — форсунка; *13* — кран; *14* — манометр; *15* — обратная линия; *16* и *18* — конденсатоотводчики; *17* — паровой спутник мазутопровода.

готовляют их из стальных цельнотянутых труб и скорость движения серы в них принимается 1—1,5 м/с. В качестве запорной арматуры используют сальниковые пробковые краны с паровыми рубашками.

Фосфоропроводы предназначены для транспортирования расплавленного фосфора из склада фосфора к форсунке башни сжигания или к печам. Фосфоропровод так же как и мазутопровод прокладывается с паровым спутником. Давление пара 400 кПа, что обеспечивает температуру на поверхности фосфоропровода 70—80 °С. Фосфоропровод изготовляют из нержавеющей стали Х18Н10Т и отдельные части его соединяют фланцами.

Трубопровод укладывают под уклоном 1 : 5000 и обязательно теплоизолируют. Скорость движения фосфора по фосфоропроводу

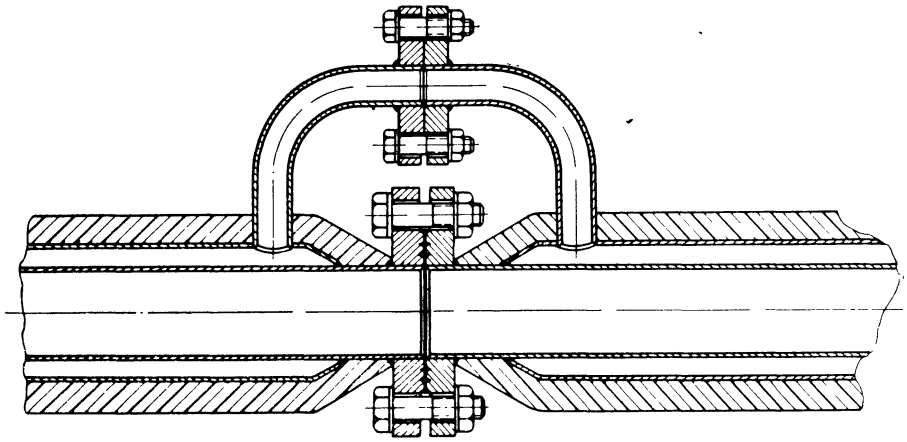


Рис. 185. Узел стыкования серопроводов.

принимается 1—2 м/с. Трубы до $d_{усл} = 50$ устанавливаются по ГОСТ 9941—62, с $d_{усл} = 50$ по ГОСТ 9940—62.

На фосфоропроводе устанавливается штуцер с краном для подвода горячей воды (70—80 °С) для промывки фосфоропровода. Промывку осуществляют противотоком.

Паропроводы предназначены для транспортирования пара, необходимого для обогревания мазута, фосфора, серопроводов, а также форсунок для серы, фильтров и распыления мазута в мазутных форсунках.

Диаметр паропровода определяется, исходя из давления пара и требуемой обогреваемой поверхности паропроводов при заданной температуре транспортируемого материала.

Дымопроводы, по которым транспортируются газы, содержащие большое количество пыли, подлежат периодической очистке. Отдув пыли от стенок дымопровода производится сжатым воздухом, подаваемым устройством, показанным на рис. 186.

Дымовые трубы. О б щ и е с в е д е н и я. Дымовая труба позволяет создавать разрежение, необходимое для движения продуктов горения топлива и реакционных газов, выделяющихся при техноло-

гическом процессе в печи, от топки, через рабочее пространство печи, систему дымоходов и теплоиспользующих устройств с удалением их в окружающее пространство на достаточно большой высоте. В большинстве случаев, выбрасываемые газы от печей в химической промышленности, содержат токсические вещества, предельно допустимые концентрации которых регламентированы санитарными нормами проектирования промышленных предприятий. Поэтому после определения высоты трубы по необходимому разрежению, необходима проверка на удельные концентрации газа у поверхности земли. В случае необходимости увеличения высоты трубы, для создания

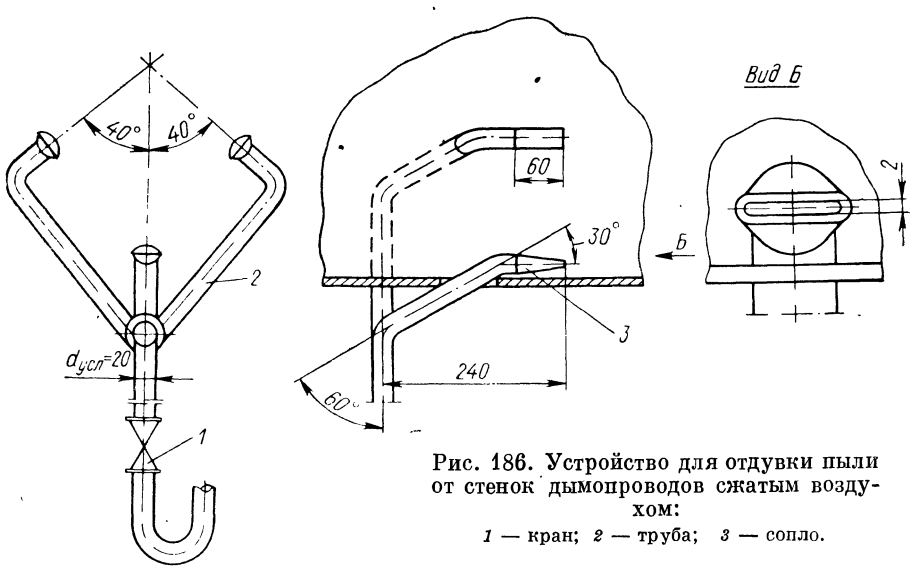


Рис. 186. Устройство для отдувки пыли от стенок дымопроводов сжатым воздухом:
1 — кран; *2* — труба; *3* — сопло.

допустимых удельных концентраций газов следует заново провести гидравлический расчет при известной высоте трубы для создания необходимого разрежения в печи. В соответствии с требованиями санитарной техники и пожарной охраны высота дымовой трубы должна быть на 3—5 м выше конька наиболее высокого здания в радиусе 100 м.

Дымовые трубы, применяемые в химической промышленности, различны в зависимости от агрессивности газов, их температуры и по высоте (рис. 187). Кирпичные дымовые трубы имеют максимальную высоту 150 м; допустимая температура пропускаемых через них газов до 800 °С. Железобетонные трубы: максимальная высота 200 м, допустимая температура газов 200 °С. Трубы из обычного бетона при наличии футеровки и теплоизоляции не должны нагреваться более 500 °С. Металлические футерованные трубы: максимальная высота 60 м; допустимая температура до 800 °С.

Для выброса агрессивных газов из печей чаще применяют металлические трубы, собранные из отдельных царг из нержавеющей стали, высотой до 150 м, установленных на специальных опорных

конструкциях, позволяющих замену любой части ствола трубы в случае выхода из строя.

На одной опорной установке иногда устанавливают три дымовые трубы, что значительно уменьшает площадь, занимаемую трубами, сокращает расход металла на опорные устройства.

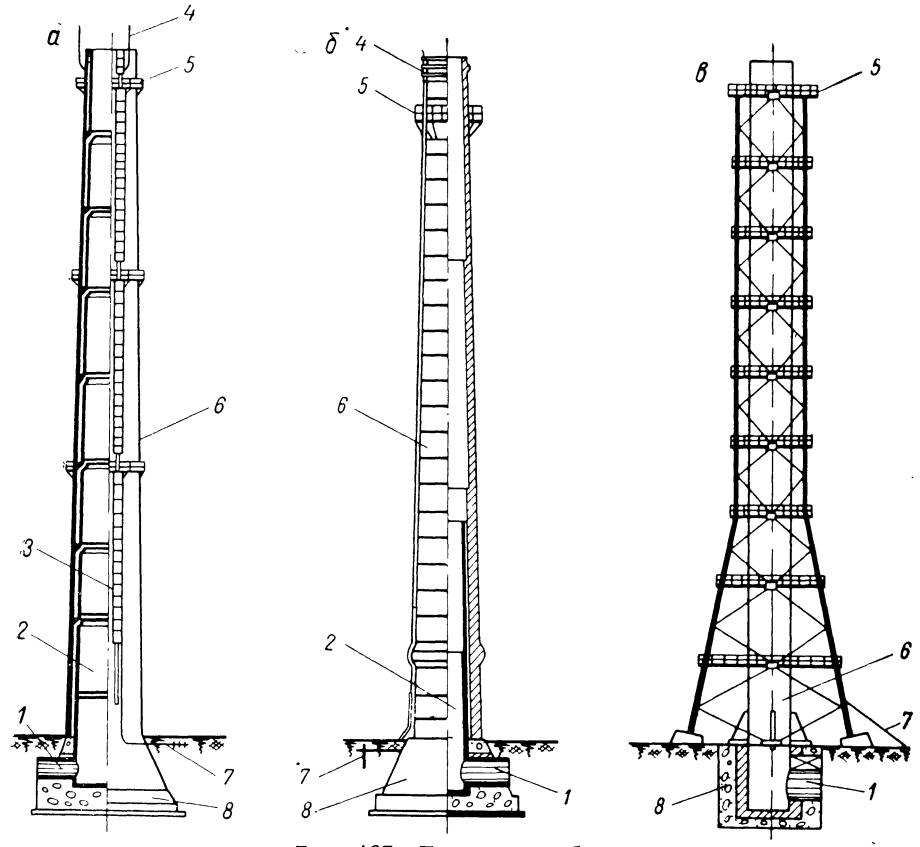


Рис. 187. Дымовые трубы:

а — железобетонная; *б* — кирпичная; *в* — металлическая; *1* — боров; *2* — огнеупорная футеровка; *3* — лестница; *4* — молниеотвод; *5* — площадка; *6* — ствол трубы; *7* — заземление; *8* — фундамент.

Определение основных размеров. Площадь поперечного сечения устья трубы определяют по формуле:

$$f = V_{\text{ух. г}}/w$$

отсюда диаметр в устье трубы:

$$d = \sqrt{4V_{\text{ух. г}}/\pi w}$$

где $V_{\text{ух. г}}$ — объем отходящих газов, м³/с; w — скорость в устье трубы, м/с.

Скорость газов w принимают 3—5 м/с. При колебании расхода топлива скорость газов не должна выходить за пределы 2—8 м/с. При скорости меньше 2 м/с возникает опасность затекания холодного воздуха через устье трубы, а при скорости больше 8 м/с слишком велико гидравлическое сопротивление трубы. Для кирпичных, железобетонных и футерованных металлических труб минимальный диаметр устья должен быть не менее $d_{\text{усл}} = 800$ мм.

Величину разрежения ΔP, требуемого для нормальной работы печи, определяют по сумме величин сопротивлений: местных $\sum h_м$, трения $\sum h_{тр}$ и связанных с наличием геометрического напора $\sum h_г$:

$$\Delta P = k\left(\sum h_м + \sum h_{тр} + \sum h_г\right)$$

При определении величины потери напора по пути движения дымовых газов учитываются сопротивления всего дымового тракта до дымовой трубы, а также сопротивление самой дымовой трубы. Количество отходящих газов и их температура на различных участках тракта принимается с учетом подсоса воздуха. Для компенсации неучтенных сопротивлений и для обеспечения нормальной работы дымовой трубы при различных режимах работы печи и засорении каналов вводится коэффициент $k = 1{,}2—1{,}4$.

Высоту дымовой трубы H определяют по формуле:

$$H = \frac{\Delta P}{(\rho_{возд} - \rho_г)\, q \dfrac{B}{1{,}01325 \cdot 10^5}}$$

где ΔP — требуемое разрежение с учетом запаса, Па; $\rho_{возд}$ — плотность воздуха при максимальной для данного района летней температуре, кг/м³; $\rho_г$ — плотность отходящих газов при средней температуре в дымовой трубе, кг/м³; q — ускорение свободного падения, м/с²; B — барометрическое давление, Па.

Плотность воздуха при 0 °С ($\rho_{возд}$) может быть принята равной 1,29 кг/м³, а газов ($\rho_г$) = 1,3 кг/м³. При расчетах следует учитывать падение температуры (табл. 75) в каналах вследствие отдачи тепла в окружающую среду.

Таблица 75

Изменение температуры в каналах

Температура, °С	Изменение температуры в каналах, °С/м		
	подземных кирпичных	надземных кирпичных	
		изолированных	неизолированных
200—300	1,5	1,5	2,5
300—400	2	3	4,5
400—500	2,5	3,5	5,5
500—600	3	4,5	7
600—700	3,5	5,5	10

Среднюю температуру воздуха $t_{возд}$ по высоте трубы определяют по формуле:

$$t_{возд} = t'_{возд} - \sqrt{H/2}$$

где H — ориентировочная высота трубы, м; $t'_{возд}$ — температура воздуха у основания трубы, зависящая от климатических условий, °С.

Климат:
умеренный . . . . . 5—20 °С
жаркий . . . . . 15—25 °С
холодный . . . . . 10—+10 °С

Коэффициент трения о стенки трубы можно принимать:

Для кирпичных труб 0,05
» металлических » 0,03

Если одна дымовая труба обслуживает несколько печей, то расчет ведут на суммарное количество дымовых газов и берут разрежение по наибольшему сопротивлению дымового тракта (а не по сумме сопротивлений всех печей). Так как совместная работа печей создает ряд дополнительных неблагоприятных условий (подсосы от неработающих печей, взаимное влияние нескольких подводимых потоков

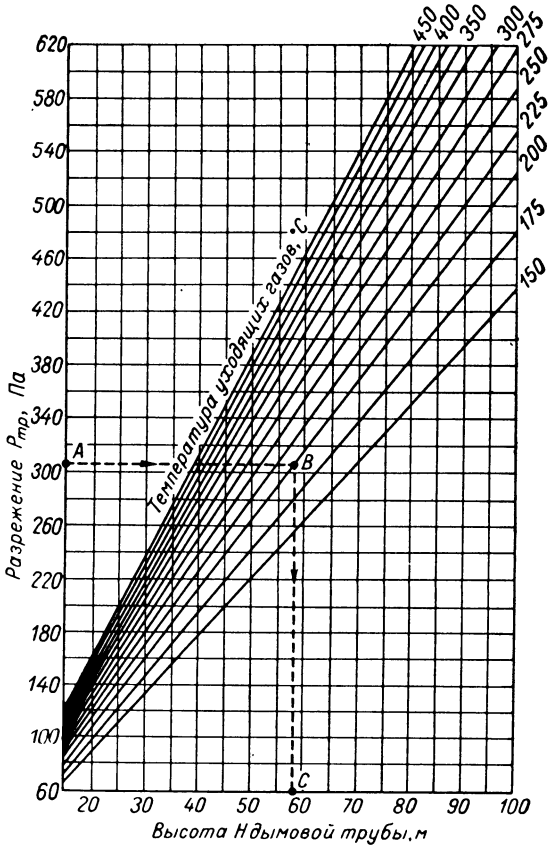


Рис. 188. График для определения ориентировочной высоты дымовой трубы при температуре наружного воздуха 0 °С.

и пр.), то следует брать наибольший запас по количеству дымовых газов и разрежению.

Для определения ориентировочной высоты дымовой трубы можно пользоваться данными (рис. 188 и 189), составленными в зависимости от температуры наружного воздуха.

Дымовые шибера. Устройства для достаточно плотного отключения печей от тяговой установки, а также для достижения легкого и чувствительного регулирования количества дымовых газов, выходящих из печи, и их давления называется шибером.

Шибер ставится при выходе отходящих газов из камеры печи и представляет собой чугунную, керамическую заслонку, опущенную в боров и подвешенную на тросе, перекинутом через блок с противовесом или непосредственно на барабан ручной или электрической лебедки. Шибера в боровах для зоны с температурой дымовых газов до 600 °С выполняются из чугуна (рис. 190). Поворотный шибер

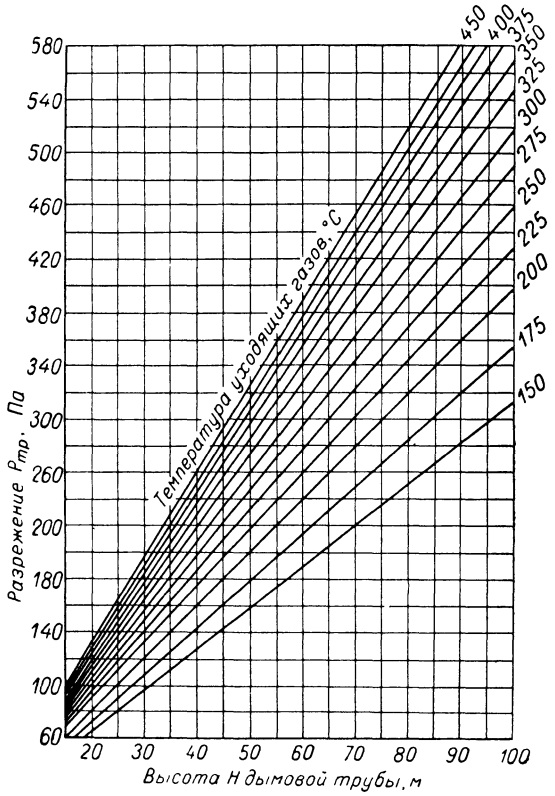


Рис. 189. График для определения ориентировочной высоты дымовой трубы при температуре наружного воздуха 30 °С.

показан на рис. 191. Для зоны выше 600 °С шибера для предотвращения коробления выполняются водоохлаждаемыми (рис. 192) или керамическими (рис. 193).

Для закрывания шибера в поднятом состоянии и с целью создания большой герметичности его заключают в сварной металлический короб, в котором оставляют отверстие для пропускания троса или тяги. Заслонка шибера печей, работающих на газовом топливе, должна иметь отверстие диаметром 50 мм для создания тяги в печи при опущенном шибере. Наличие тяги предотвращает скопление взрывоопасной газовоздушной смеси в камере печи, образующейся из-за неплотностей газорегулирующих задвижек.

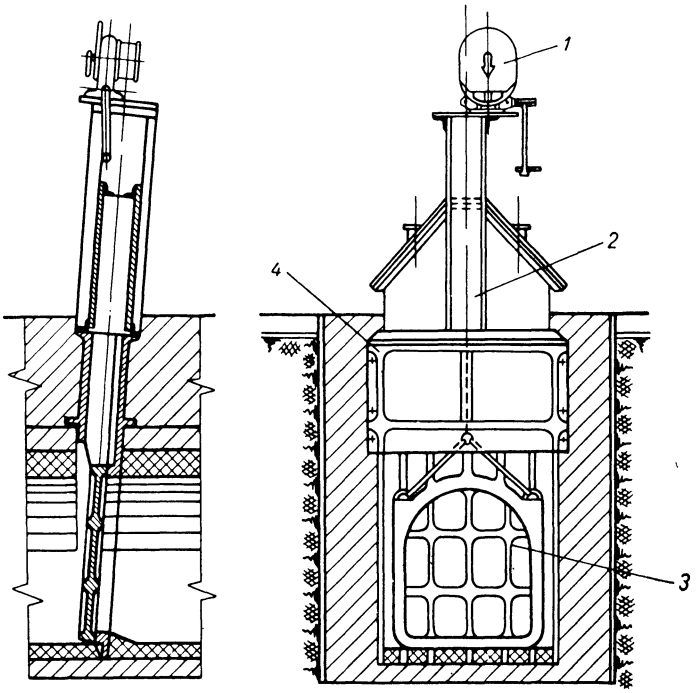


Рис. 190. Шибер металлический:
1 — механизм подъема шибера; *2* — короб; *3* — чугунный шибер; *4* — плита.

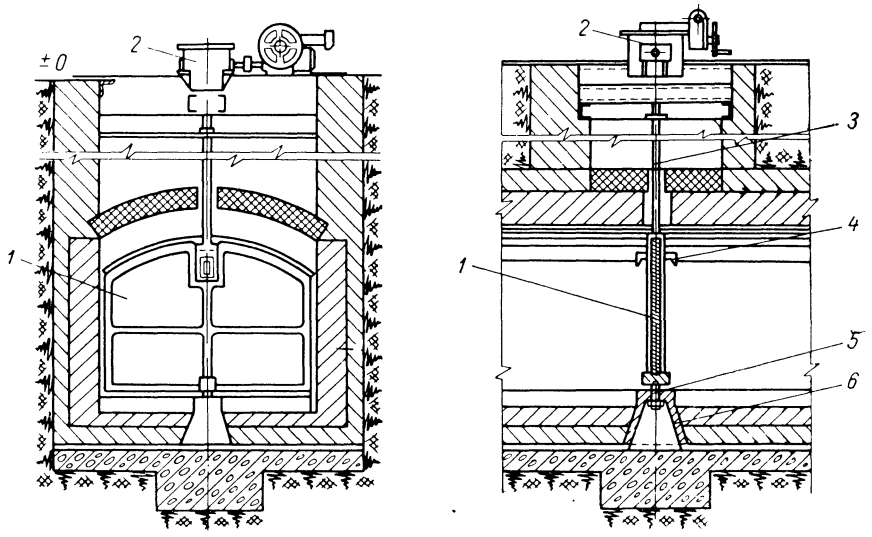


Рис. 191. Шибер поворотный:
1 — шибер; *2* — механизм поворота шибера; *3* — тяга; *4* — штырь; *5* — опора шибера; *6* — тумба.

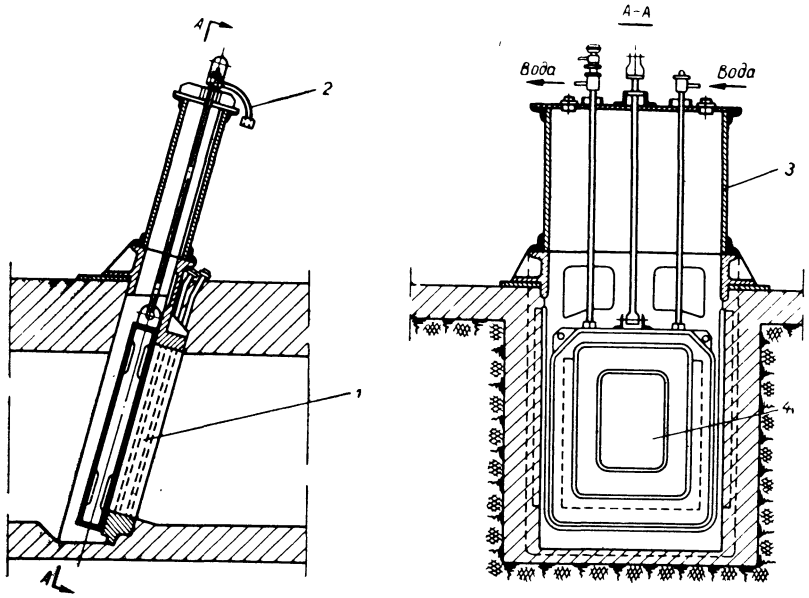


Рис. 192. Шибер водоохлаждаемый:
1 — плита; *2* — труба для подачи холодной воды; *3* — короб; *4* — шибер.

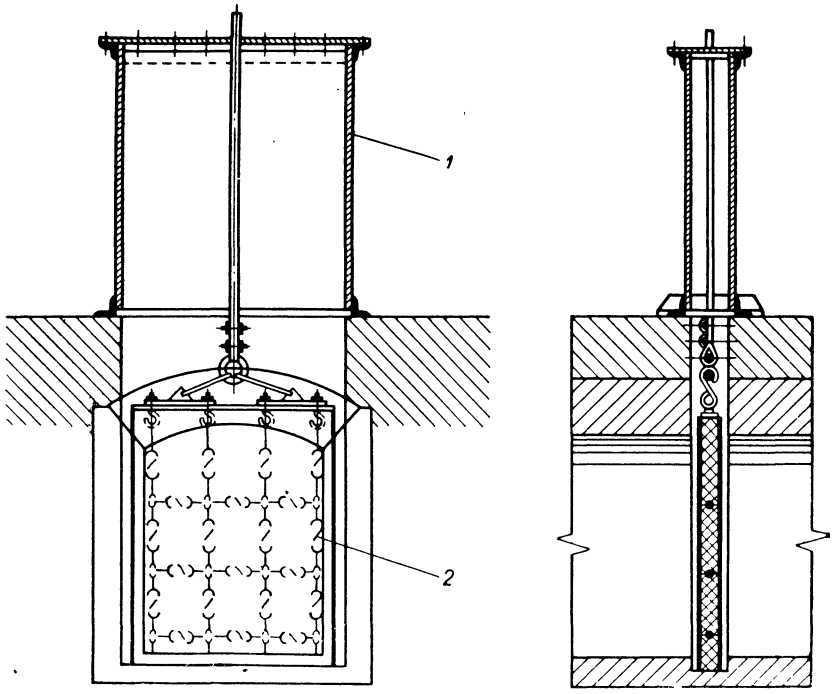


Рис. 193. Шибер керамический:
1 — короб; *2* — шибер.

ТЯГО-ДУТЬЕВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Гидравлическое сопротивление

Для выбора вентилятора или дымососа необходимо знать гидравлическое сопротивление системы, которая включает в себя потери напора, происходящие при движении газа по трубам и каналам, местные потери напора, возникающие в результате отрыва потока газа от стен и образования завихрений, а также потери в задвижках, в циклонах и необходимый напор перед горелками. Потери напора, происходящие при движении газа по трубам и каналам, определяют по формуле:

$$\Delta h = \zeta \frac{w^2}{2q} \gamma_г$$

где Δh — потери напора, Па; ζ — коэффициент гидравлического сопротивления; w — скорость газа, м/с; q — ускорение свободного падения, м/с^2; $\gamma_г$ — удельная масса газа, кг/м^3.

Различают два вида гидравлических потерь: на преодоление сил трения и на преодоление местных сопротивлений. Коэффициент сопротивления сил трения $\zeta_{тр}$ находят по формуле:

$$\zeta_{тр} = \lambda_{тр} \frac{l}{D_г}$$

где $\lambda_{тр}$ — коэффициент трения; l — длина трубы канала, м; $D_г$ — гидравлический диаметр трубы, м.

Для расчетов газо- и воздухопроводов небольшой длины с большим количеством швов, а также для расчетов каналов и боровов можно принимать следующие значения $\lambda_{тр}$:

	мм	
Для стальных труб диаметром	0—100	0,050
» » » »	100—200	0,035
» » » »	более 200	0,030

	мм	
Для каналов и боровов диаметром	100—300	0,070
» » » »	300—500	0,050
» » » »	более 500	0,040

Коэффициент потери напора на местные сопротивления $\zeta_м$ берут из справочных таблиц. Потери в циклонах НИИОГАЗа определяют расчетом, а необходимый напор перед сжигательными устройствами по графикам. Рекомендуемые значения скоростей газа и воздуха (в м/с):

Каналы и борова

Каналы, соединяющие рабочее пространство со сборными каналами и боровами	0,5—3,0
Сборные каналы	0,5—2,0
Общие дымоходы и борова	2,0—3,0
Выходное сечение дымовых труб	2,0—4,0
Дымовые трубы после дымососа	До 10,0—12,0

Воздухопроводы низкого давления (к 3000 ÷ 10 000 Па)

Подводы к отдельным горелкам	5—10
Разводка по топке печи	8—12
Общие цеховые воздухопроводы	10—15
Газопроводы низкого давления 3000—10 000 Па	8—15
Газопроводы высокого давления	30—100

Выбор вентиляторов

Для подачи воздуха в горелки на горение топлива и на разбавление дымовых газов для получения теплоносителя требуемой температуры используют центробежные вентиляторы. По величине создаваемого напора их подразделяют на вентиляторы низкого (максимальный создаваемый напор $h = 1000$ Па), среднего ($h = 1000$—3000 Па) и высокого давления ($h = 3000$—$15\,000$ Па).

Работа вентилятора характеризуется создаваемым напором $h_в$ Па, производительностью (в м³/ч), потребляемой мощностью (в кВт), частотой вращения n (в об/мин).

Все характеристики вентиляторов, по которым их подбирают, приведены для стандартных условий в виде графиков и таблиц в каталогах и справочниках.

Мощность электродвигателя для вентилятора определяют по формуле:

$$N = 0{,}35 \cdot 10^{-6} h V \frac{1}{\eta}$$

где h — суммарный напор при рабочих условиях, Па; V — максимальная производительность вентилятора при рабочих условиях, м³/ч; η — к. п. д. вентилятора по каталогу.

Выбор дымососов

Для отсоса горячих газов применяют специальные вентиляторы-дымососы (эксгаустеры), имеющие усиленную конструкцию и водяное охлаждение подшипников, вала и т. д.

Величину разрежения $\Delta h_д$, которую должен создавать дымосос, определяют по формуле:

$$\Delta h_д = h_р + \frac{w_1^2}{2g}\gamma_{г_1} - \frac{w_2^2}{2g}\gamma_{г_2} - \Delta H(\gamma_в - \gamma_г) + \sum \Delta h_w$$

где $\sum \Delta h_w$ — сумма сопротивлений каналов на входе в дымосос и трубы за дымососом, Па; $\Delta H(\gamma_в - \gamma_г)$ — геометрический напор, создаваемый столбом горячих газов между сечениями от борова и устья трубы, Па.

Дымосос выбирают по действительному количеству газов, подлежащих удалению из тепловой установки, по следующей формуле:

$$V_{г.д} = V_{г.о}\frac{T}{273}$$

где $V_{г.о}$ — объем дымовых газов, м³; T — температура газов, К.

Для предохранения электродвигателей дымососа от перегрузки в период пуска устанавливают дымовые шибера: на больших дымососах устанавливают направляющие аппараты и монтируют пусковую аппаратуру, позволяющую допускать перегрузку электродвигателей.

Глава V

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ПЕЧЕЙ

Пуск печей

Для осуществления пуска печи назначается комиссия по приемке оборудования к пуску. Комиссии предъявляют материалы согласно СНиП Ш-А-10-66 и приказа Министерства химической промышленности СССР № 726 от 14 августа 1952 г. «Об утверждении положений, связанных с проектированием и пуском в эксплуатацию объектов».

Пуск печи после ее сооружения или капитального ремонта включает в себя: подготовительные работы, сушку футеровки, разогревание печи до рабочей температуры.

Подготовительные работы. Перед началом сушки футеровки печи необходимо выполнить следующие подготовительные работы:

1. Полностью очистить печь и оборудование от строительного мусора и пр.
2. Проверить соответствие печи и оборудования по проекту и качество выполненных работ.
3. Проверить состояние и чистоту температурных швов в футеровке, наличие и чистоту зазоров температурного расширения элементов печи и правильность выполнения компенсирующих устройств.
4. Проверить отсутствие на печи или вблизи нее горючих материалов и других посторонних предметов.
5. Проверить исправность и работоспособность механизмов загрузки и выгрузки вхолостую, а в печах с вращающимся барабаном — механизмы привода.
6. Опробовать приводы и легкость хода газовых и воздушных клапанов (шиберов) на печи и боровах.
7. Проверить правильность монтажа и состояние сжигательных устройств и нагревателей.
8. Проверить внешним осмотром воздухопроводы и задвижки на них.
9. Проверить состояние газопровода, продувочных свечей, арматуры, измерительных и регулирующих приборов. Проверить отсутствие заглушек и положение вентилей, кранов, задвижек. Все вентили, краны, задвижки перед горелками и измерительными приборами должны быть закрыты.
10. Опробовать плотность газомазутопроводов путем опрессовки их, проверить плотность всей воздухоподводящей системы и системы отвода дымовых газов.
11. Осмотреть вентиляторы и дымосос, электродвигатели и пусковые устройства. Корпус электродвигателя должен быть надежно заземлен.
12. Проверить отсутствие задевания ротора вентилятора и дымососа путем провертывания вручную. Провести пробный пуск дутьевых вентиляторов и дымососа. Проверить токовую нагрузку, производительность и напор. Пуск вентиляторов и дымососа производить при закрытых задвижках на нагнетательной или всасывающей линии во избежание перегрузки электродвигателей.
13. Проверить наличие и исправность приборов КИП и автоматики.
14. Проверить наличие тяги в дымоходах.

Сушка печей. После окончания строительства печи необходима сушка футеровки для удаления оставшейся влаги, иначе при разо-

гревании печи может начаться интенсивное парообразование и начнет происходить разрушение футеровки.

Сушка футеровки и растопочных газоходов с боровами производится в соответствии со СНиП-Шг-12-62 «Технические условия на производство и приемку строительных и монтажных работ по кладке промышленных печей и труб» следующим образом.

Первоначально проводится естественная сушка печи при открытых люках и лазах для лучшей вентиляции. После этого проводят принудительную сушку воздухом, подаваемым в печь от вентилятора. Сушку воздухом обычно проводят в течение 48 ч. Одновременно с холодной сушкой проверяется работа вентилятора и замеряется гидравлический режим в печи по всем воздушным трактам.

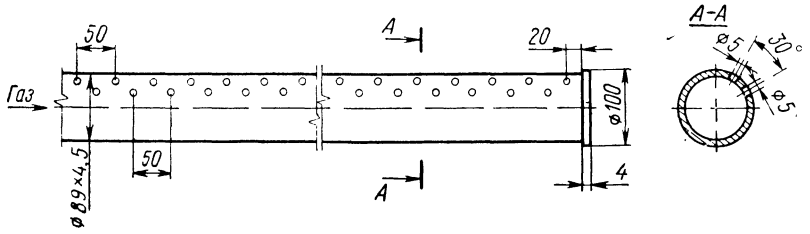


Рис. 194. Горелка природного газа для сушки и разогревания печей.

После окончания сушки печи холодным воздухом начинается сушка нагретыми дымовыми газами от сжигания природного газа или от сжигания дров. Печи с мощными сжигательными устройствами сушат временными горелками на природном газе. Конструкция горелки приведена на рис. 194. Количество временных горелок определяется руководителем работ по пуску печи.

При отсутствии природного газа сушку печей осуществляют дровами. Потребность дров на 1 м³ футеровки составляет:

Объем кладки, м³	20	20—50	50—100	100
Потребление дров, м³/м³	0,50	0,40	0,35	0,25

Временные горелки или костры в рабочем пространстве печи располагают так, чтобы обеспечить равномерный его обогрев, а видимое пламя не достигало контрольных термопар.

Печи с сжигательными устройствами малой мощности или с нагревателями сушат и разогревают до рабочих температур основными источниками тепла.

При сушке футеровки топки шахтных многозонных печей в производстве катализатора и печей КС температура дымовых газов не должна превышать 500 °С. Температура дымовых газов при выходе из этих печей не должна превышать 150 °С, для чего необходимо держать открытыми люки и лазы.

Продолжительность сушки печей, сложенных из огнеупорного кирпича, определяется: размерами, назначением и конструктивными особенностями печей, примененными в футеровке огнеупорного

материала и толщиной футеровки, временем года, когда производилось строительство печи, длительностью промежутка времени с момента окончания строительства до начала пусковых работ и качеством футеровочных работ.

При сушке вновь построенных печей можно рекомендовать температурный режим, приведенный в табл. 75.

Зависимость средней продолжительности сушки печей от поверхности кладки со стороны рабочего пространства приведен на рис. 195.

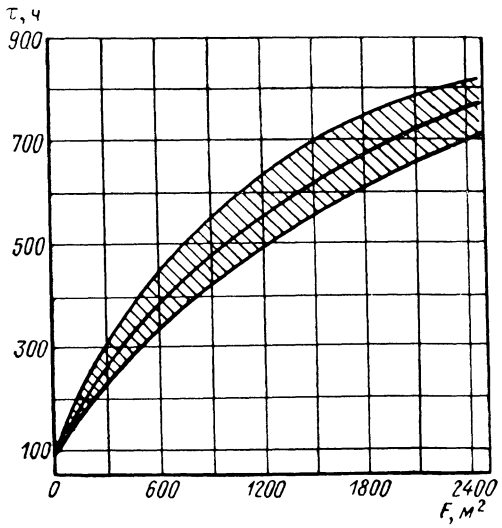


Рис. 195. Средняя продолжительность сушки печей.

Значения продолжительности сушки печей, полученные из рис. 195, следует увеличивать до 30% (верхняя линия), если кладка выполнена зимой или при сырой погоде, или если очень большая толщина кладки; и, наоборот, несколько уменьшить (нижняя линия), если кладка выполнялась летом при благоприятных для строительства условиях, или если стены печи очень тонкие.

Небольшие печи, сложенные летом, сушат и разогревают со скоростью 50, 35 и 25 °С/ч при объеме футеровки соответственно 20, 20—50 и 50—100 м³. Крупные печи после строительства сушат и разогревают со скоростью 5—10 °С/ч, а после замены футеровки при холодном ремонте 15—25 °С/ч.

Сушку печи осуществляют строго по графику, где должны быть учтены все факторы, влияющие на продолжительность сушки.

Процесс сушки печи контролируется с помощью переносных контрольно-измерительных приборов.

Таблица 76

Температурный режим сушки построенных печей

Материал кладки	Температура, °С	Допустимая скорость подъема температуры, °С/ч
Шамотный кирпич . .	—	25—40
Динасовый кирпич . .	0—150	5—10
То же	150—300	10—20
»	300—650	20—40
»	Выше 650	40—50

Розжиг печей

Пуском печи следует считать розжиг. Перед розжигом необходимо произвести тщательный осмотр состояния печи после сушки.

Пуск печей производится только при ручном управлении регулирующими устройствами. Переход на автоматическое регулирование допускается после полного стабилизирования технологического режима всей установки.

Розжиг печей зависит от вида топлива.

Розжиг печей на газовом топливе. Осуществлять розжиг печи, работающей на газовом топливе, разрешается при наличии акта о проверке газопроводов, дымоходов и контрольно-измерительных приборов.

При эксплуатации печей и топок, работающих на газовом топливе, необходимо руководствоваться «Правилами безопасности Госгортехнадзора», так как все горючие газы с воздухом в определенных объемных отношениях взрывоопасны. При утечках газа через неплотности газопроводов и газового оборудования возникает опасность пожара или взрыва.

В связи с этим розжиг печей и топок на газообразном топливе (кроме печного газа) проводят в следующем порядке.

Перед розжигом печи необходимо продуть газом сначала подводящий газопровод, а затем газопровод у печи. Для этого закрывают кран на трубопроводе безопасности и открывают кран продувочного трубопровода, а затем общую отключающую задвижку. Давление газа поднимают постепенно. Окончание продувки газопровода устанавливается анализом пробы выходящего из продувочного газопровода газа на содержание в нем кислорода. Оно не должно превышать 1%.

Проба для анализа отбирается через имеющийся запальник.

Продолжительность продувки составляет 2—5 мин. По окончании продувки закрывают кран продувочного трубопровода, проверяют закрытие крана запальника и крана перед горелкой. Проверяют состояние кладки, гарнитуры и механизмов печи, клапана блокировки, наличие необходимого давления газа по манометру у печи.

Перед розжигом печи необходимо открыть шибер печи и убедиться в том, что в печи имеется разрежение не менее 10—20 Па и во избежание взрыва газовоздушной смеси необходимо в течение 10 мин тщательно продуть рабочее пространство печи и дымоходы. Для этого должно быть обеспечено поступление воздуха в печь через рабочую заслонку или через имеющиеся отверстия (запальные окна и т. д.).

При работе на двухпроводных газовых горелках перед их зажиганием следует проверить по манометру наличие необходимого давления воздуха для дутья. Вентиляцию печи следует производить до момента розжига горелок.

При розжиге горелок нужно придерживаться следующего порядка. Сначала спичкой зажигают газовый запальник, а затем

постепенно открывают газовый кран запальника. При достижении устойчивого горения газа, выходящего из запальника, последний вводят через смотровое или специальное запальное отверстие горелки. При этом воздушная задвижка двухпроводной горелки или воздушнорегулировочная шайба инжекционной горелки должна быть закрыта.

При срыве пламени или его погасании на запальнике необходимо быстро закрыть кран запальника, вынуть его из печи, и вновь провентилировать печь для удаления газовоздушной смеси. При устойчивом горении газа из запальника постепенно открывают газовую задвижку или кран на горелке, чтобы выходящий из горелки газ воспламенился. Затем постепенно начинают подавать воздух.

При подаче воздуха необходимо следить за процессом сгорания газа: если процесс идет нормально, то пламя прозрачное и имеет голубоватый цвет, если пламя мутное и имеет желтые языки, то это свидетельствует о недостатке воздуха. В этом случае необходимо постепенно увеличить подачу воздуха до получения нормального горения.

По окончании зажигания горелок запальник необходимо вынуть из печи, уменьшить величину факела и повесить около печи. Горящий запальник служит сигнализатором поступления газа к горелкам.

Безопасное и экономичное сжигание газов возможно только при условии устойчивости горения. Поэтому в процессе эксплуатации следует выполнять следующие режимные мероприятия.

Во избежание отрыва пламени от горелки следует:

1. Не допускать работы горелок с перегрузкой, т. е. на большем давлении газа и воздуха перед ними, чем это предусмотрено инструкцией.
2. Увеличивать подачу газа и воздуха в горелки с принудительной подачей воздуха попеременно, небольшими дозами при помощи регулирующих органов.
3. Не допускать работы горелок с повышенным шумом и отрывающимся неровным пламенем, которое возникает из-за повышенных выходных скоростей газовоздушной смеси или чрезмерно большого избытка первичного воздуха.
4. При работе горелок полного смешения во время их розжига не давать первичного воздуха более 50—60%, необходимого для горения, пока рассекатель или туннель не раскалится докрасна.
5. Не повышать нагрузку горелки до полной до тех пор, пока топка достаточно не прогреется, а своды, стабилизирующие огнеупорные горки и омываемые факелом, не раскалятся.
6. Увеличивать тягу плавно в особенности при работе инжекционных горелок низкого давления.
7. При отрыве пламени от горелки следует быстро прекратить подачу газа в горелку и включать ее вновь в работу лишь после вентиляции печи примерно в течение 10—15 мин (при работе нескольких горелок вентиляции печи не требуется).

Во избежание проскока пламени в горелке:

1. Не допускать работу горелки при давлении газа перед нею ниже предусмотренного инструкцией.
2. Повышая нагрузку горелок с принудительной подачей воздуха, следует сначала увеличивать подачу газа, а затем воздуха; наоборот, при понижении нагрузки горелок сначала уменьшить подачу воздуха, а затем — газа.
3. Зажигание газа в горелках производить на вторичном воздухе, а подачу первичного воздуха после загорания газа.

4. При отключении сначала снизить производительность горелок до минимальной (согласно инструкции), а затем быстро отключить подачу газа.

5. При работе горелок неполного предварительного смешения не допускать их работы с повышенной подачей первичного воздуха, обедняющего смесь и повышающего скорость распространения пламени.

6. Не допускать перегревания выходной головки горелки (при проскоке пламени в горелку следует отключать подачу газа в горелку и не включать до полного ее охлаждения).

7. Уменьшать тягу в топке следует осторожно, наблюдая за нормальной работой горелки.

Розжиг печей на мазутном топливе. Циркуляционные мазутопроводы заполняют мазутом заблаговременно, а тупиковые — в день включения форсунок. Сначала подают пар в обогреваемую линию с включенными конденсатоотводчиками. Затем пропаривают мазутопроводы, выпуская пар в печь через форсунки, которые будут включены в первую очередь. Пропаривание прекращают, когда мазутопроводы станут горячими наощупь и немедленно заполняют мазутопроводы мазутом. Затем к туннелю зажигаемой форсунки подносят горячий факел, выполненный из толстой проволоки с намотанной на нее паклей и смоченной мазутом, и понемногу начинают подавать через форсунку распылитель, а после этого мазут. Воздух на горение включают, убедившись в воспламенении мазута.

Последующие форсунки включают после получения устойчивого горения и нормального факела у первой форсунки.

Разогрев печей

После розжига печи начинают ее разогрев до рабочих температур. Разогрев необходимо проводить медленно и равномерно, чтобы предотвратить разрушение футеровки.

В небольших печах окончание сушки ее дымовыми газами от сжигания природного газа является началом разогрева. В больших печах разогрев ведут основными сжигательными устройствами после удаления из печи временных горелок. Скорость разогрева печи указывается на графике пуска ее (включая сушку).

В процессе разогрева печи необходимо особенно внимательно наблюдать за сводами и состоянием температурных швов.

Разогрев печи, бывшей в эксплуатации, но находившейся длительное время в холодном состоянии, производится со скоростью 100—150 °С/ч, а при перерыве менее суток — 200—300 °С/ч.

Момент загрузки печи материалом (садкой) следует считать вводом печи в эксплуатацию.

Остановка печей

Остановку печей производят в следующей последовательности. Сначала переходят на ручное дистанционное управление технологическим процессом в печи. Затем прекращают подачу материала в печь, выключают подачу мазута в форсунки или природного газа в горелки. Для этого необходимо в несколько приемов уменьшить подачу воздуха в газ (при двухпроводных горелках). Если установлены инжекционные горелки, то нужно снижать только расход газа.

После выключения всех газовых горелок перекрывают рабочую и контрольные задвижки на подводящем к печи газопроводе и открывают кран на трубопроводе безопасности; включают дутьевой вентилятор; выгружают продукт из печи и выключают механизм разгрузки, затем выключают дымосос.

При остановке вращающихся печей после выгрузки из нее продукта печь охлаждают при вращении барабана, чтобы барабан не провис. Приводной механизм выключают только после охлаждения вращающегося барабана.

В последнюю очередь закрывают дымовой шибер, установленный на борове.

ОХРАНА ТРУДА И ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПЕЧЕЙ

При эксплуатации печей химических производств имеется большое количество производственных операций, при выполнении которых необходимы специальные меры по охране труда и технике безопасности. Невыполнение этих мер и несоблюдение технологического режима может вредно отразиться на здоровье обслуживающего персонала или может быть причиной производственных аварий.

Токсические свойства химических веществ. Степень и характер нарушения нормальной деятельности организма зависят от концентрации вредного вещества, продолжительности его воздействия и токсических свойств. По характеру возникновения и течения различают острые и хронические формы отравлений. Острая форма отравлений развивается в результате кратковременного действия на организм больших концентраций вредных веществ. Хроническая форма отравлений развивается в результате длительного воздействия относительно малых концентраций вредных веществ.

Для предотвращения отравлений и профессиональных заболеваний содержание вредных веществ в воздухе производственных помещений не должно превышать определенной величины.

Желтый фосфор — конечный продукт электротермической переработки фосфоритов. Это — сильнодействующий яд, смертельная доза для человека составляет 0,05—0,06 г. Попадая в желудок человека, вызывает острое отравление, которое сопровождается рвотой (выброшенное содержание желудка светится в темноте), резкими болями, кровавым поносом, головокружением, ослаблением пульса. Предельно допустимая концентрация желтого фосфора в воздухе производственных помещений составляет 0,03 мг/м^3.

При длительной работе в атмосфере, содержащей пары фосфора, концентрация которых выше нормы и в случае нарушения правил личной гигиены и техники безопасности, наступает хроническое отравление, обусловливаемое способность фосфора аккумулироваться в организме человека. Постепенное проникновение желтого фосфора в ткани человеческого организма и накапливание его происходит, главным образом и наиболее легко — через кариозные зубы и вызывает некроз — омертвление костей, особенно челюстей.

Желтый фосфор и фосфорный шлам на воздухе самовоспламеняются. Расплавленный горячий фосфор и фосфорный шлам (струя, капли) при попадании на кожные покровы вызывают сильные, медленно заживающие ожоги. Вначале на теле появляется резко очерченное красное пятно, а с течением времени на этом месте возникает язва.

В случаях отравления фосфором рекомендуется через каждые 10 мин в течение часа пострадавшему давать рвотное средство — 0,2 г медного купороса (в виде водного раствора) на один прием.

При попадании фосфора или фосфорного шлама на тело, необходимо немедленно потушить горячий фосфор (лечь в ванну с водой), накинуть на пламя смоченную водой ткань, залить горячий фосфор струей воды из-под крана и освободить пострадавшего от горячей одежды. Удалить все видимые частицы фосфора и фосфорного шлама, наложить на ожог повязку, обильно смоченную 2% раствором $CuSO_4$ или 3—5% раствором $KMnO_4$. Вазелин и мази применять нельзя, так как они способствуют более глубокому проникновению фосфора в организм.

На рабочем месте всегда должны иметься защитные очки-светофильтры, респираторы, рукавицы. Каждый рабочий должен иметь при себе и пользоваться при необходимости противогазом марки БКФ.

В цехе должен находиться аварийный запас спецодежды, спецобуви, противогазов марки БКФ, а также шланговые противогазы марок ПШ-1, ПШ-2 и кислородные приборы КИП-5. Кроме того, должна быть аптечка для оказания первой помощи с набором медикаментов, установленная врачом здравпункта, и инструкция по применению.

Работать можно только в спецодежде установленного образца (суконный или асбестовый костюм, резиновые сапоги, резиновый фартук, кожаные рукавицы и защитные очки). Костюм необходимо наглухо застегнуть на молнию, брюки следует заправлять в сапоги с напуском на голенище, чтобы исключить возможность попадания фосфора на тело. В цех нельзя допускать посторонних лиц.

На рабочих местах должны быть ванны с чистой теплой водой, души, растворы медного купороса и перманганата калия; фосфор и фосфорные шламы должны быть всегда покрыты слоем воды.

В целях сохранения здоровья работающих, необходимо строго соблюдать следующие правила личной гигиены: полоскать полость рта в течение рабочей смены 1—2% раствором $KMnO_4$; не употреблять пищу в помещении цеха; не трогать пищевые продукты немытыми руками; не курить в цехе и не брать папиросы немытыми руками; принимать душ после работы.

Необходимо тщательно следить за состоянием зубов; больные зубы следует лечить или удалить, после работы обязательно чистить зубы щеткой и зубным порошком; обращаться к зубному врачу для осмотра зубов не реже раза в месяц; не менее 2 раза в год проходить общий врачебный осмотр для контроля за состоянием внутренних органов (легких, сердца, печени, почек), на которые фосфор оказывает воздействие.

Пятиокись ванадия, применяемая в печах при производстве катализаторов, является вредным веществом и вызывает изменение в кровообращении, органов дыхания, нервной системы, обмена веществ, вызывает воспалительные и аллергические заболевания кожи. Предельно допустимая норма в рабочем помещении цеха 0,002 мг/м³.

Катализаторы высоко- и низкотемпературные по действию на организм человека аналогичны действию пятиокиси ванадия. Предельно допустимая норма в рабочем помещении цеха — 0,5 мг/м³.

Пыль накапливается в большом количестве при работе шахтных печей, обжиговых и агломерационных машин, руднотермических и содовых печей. Пыль помимо загрязнения производственных помещений, оборудования и окружающего воздушного бассейна, вредно действует на организм человека. Так пыль кварцита вызывает хроническое заболевание легких — силикоз; пыль фосфорита — раздражение слизистых оболочек и изменение в легочной ткани; пыль кокса — кашель, боли в груди, одышку и бронхит.

Известковая пыль (особенно негашеной извести) из известково-обжиговых печей действует на слизистые оболочки глаз, раздражает и даже причиняет ожоги кожи, при соприкосновении с водой выделяет большое количество тепла.

Содовая пыль при вдыхании раздражает слизистые оболочки носа и вызывает заболевание органов дыхания.

Агломерат при длительном воздействии может вызвать раздражение слизистых оболочек и изменение легочной ткани.

Допустимые нормы содержания пыли в воздухе (в мг/м³) производственных помещений следующие:

Известковая пыль, не более	10	Содовая пыль, не более	10
Фосфоритная пыль, не более	5	Агломерат, не более	6
Кварцитная пыль, не более	1	Смесь коксовой и кварцитной пыли, не более	2
Коксовой пыли, не более	4		

Для предотвращения выделения пылесодержащих газов в производственные помещения и в воздушный бассейн печи обжиговые и агломерационные машины должны работать под разрежением и снабжены пылеулавливающим оборудованием.

Электродная масса — твердое вещество, состоящее из смеси антрацита, кокса, каменноугольного пека и смолы. *Пыль электродной массы* может вызвать рак кожи и легких; предельная концентрация — 10 мг/м³.

Шлак из фосфорных печей представляет собой жидкий продукт. Пыль шлака вызывает заболевание верхних дыхательных путей — бронхит и пневмокониоз. Предельная концентрация — 4 мг/м³.

Сернистый ангидрид (SO_2), получаемый в печах после обжига колчедана или сжигания серы и сероводорода, вызывает раздражение кожи, слизистых оболочек носа, глаз и верхних дыхательных путей. При содержании в воздухе 60 мг/м³ SO_2 возможны острые отравления, сопровождающиеся отеком легких и расширением сердца.

Предельно допустимая концентрация SO_2 в воздухе рабочей зоны производственных помещений не должна превышать 10 мг/м³.

Чтобы избежать отравлений при аварийном выделении SO_2, необходимо надевать фильтрующие противогазы. Пострадавшего надо немедленно вынести на свежий воздух, дать ему вдохнуть кислород и ввести внутрь 1—2% раствор $NaHCO_3$.

Серный ангидрид (SO_3), содержащийся в отходящих газах после обжига колчедана, соединяясь с парами воды, образует туман, состоящий из мелких капелек серной кислоты, и затрудняет дыхание. Предельно допустимая концентрация SO_3 в воздухе рабочей зоны не должна превышать 1 мг/м³.

Сероводород (H_2S), поступающий на сжигание в печи, является сильнейшим ядом. При больших концентрациях (выше 1 г/м³) отравление происходит мгновенно, вызывая судороги и потерю сознания, смерть наступает вследствие паралича дыхательного центра. Предельно допустимая концентрация H_2S в воздухе рабочей зоны составляет 10 мг/м³.

Фосфористый водород (PH_3) представляет собой горючий газ и является сильным ядом, вредно действующим на нервную систему, а также на кровеносные сосуды, органы дыхания, печень и почки. Предельно допустимая концентрация в воздухе производственных помещений составляет 0,1 мг/м³.

Фосфорный ангидрид (P_2O_5) — промежуточный продукт при производстве термической фосфорной кислоты из желтого фосфора или фосфорного шлама. Попадая в дыхательные органы человека, поражает слизистые оболочки, вызывая кашель, доходящий до рвоты, удушье, отек легких, слезотечение и резь в глазах. На кожу действует раздражающе и прижигающе. Предельно допустимая концентрация P_2O_5 в воздухе рабочего помещения составляет 1 мг/м³.

Для предотвращения попадания P_2O_5 в воздух необходимо следить за своевременным устранением нарушений уплотнений у трубопроводов и аппаратов, а также за наличием необходимого разрежения в системе печи сжигания не менее 5 Па.

Печной газ — один из важнейших побочных продуктов, образующихся при работе фосфорной печи. Печной газ (окись углерода) является сильным отравляющим веществом. Содержание его в воздухе рабочих помещений может быть не более 30 мг/м³, в пересчете на фтористый водород не более 0,5 мг/м³.

Печной газ содержит элементарный фосфор и поэтому обладает способностью самовоспламенения, и при определенном соотношении с кислородом исключительно взрывоопасен.

В опасных точках, т. е. над печью, над печными бункерами и газовой станции необходимо устанавливать приборы для наблюдения за составом воздуха в помещении цеха. В указанных точках регулярно автоматически отбираются пробы воздуха и анализируются на содержание в нем CO. При повышении предельной величины CO (0,05%) подается сигнал тревоги и персонал, работающий в этих местах, должен надеть противогазы. Газодувки для печного газа должны выполняться в герметичном исполнении и обогреваться

паром или горячей водой. Они должны иметь подвод горячей воды для промывки. Отвод конденсата и промывочной воды следует осуществлять через гидрозатвор.

Все установки, в которых печной газ используется в качестве топлива, должны иметь систему автоматической отсечки подачи газа в случае: остановки дымососа, падения давления газа, падения давления первичного воздуха, погасания пламени, отсутствия электроэнергии. При отсечке печного газа в газоход должен автоматически подаваться инертный газ.

Все места печи, неподдающиеся полной герметизации, должны находиться под давлением инертного газа.

Для повышения безопасности работы цеховой персонал должен хорошо знать инструкцию по технике безопасности и строго выполнять ее требования. Особое внимание следует обращать на то, чтобы приточная и вытяжная вентиляции всегда находились в исправном состоянии и включались в работу при пуске цехов.

Химические ожоги. *Термическая фосфорная кислота* (H_3PO_4) особенно горячая (как и горячий фосфор), при попадании на тело вызывает сильные ожоги, так как является активным водоотнимающим веществом.

При попадании кислоты на кожу следует немедленно тщательно промыть пораженное место обильной (не сильной) струей воды и смочить пораженный участок 5% раствором $KMnO_4$. При поражении глаз необходимо тщательно промыть их водой и немедленно обратиться к врачу. Разлитую на полу цеха кислоту необходимо нейтрализовать известью, известковым молоком или кальцинированной содой, затем обильно промыть водой и осушить.

Серная кислота (H_2SO_4) при попадании на кожу вызывает сильные долго незаживающие ожоги. Ожоги на большом участке поверхности кожи очень опасны, иногда и смертельны. Попавшую на кожу серную кислоту необходимо смыть сильной струей холодной воды, затем обожженную поверхность тела смочить 3% раствором $NaHCO_3$ и смазать вазелином. При обслуживании насосов, кранов, вентилей кислотопроводов необходимо пользоваться предохранительными очками.

Электробезопасность. Электроэнергия — основной вид энергии в ряде печей химических производств и поэтому необходимо помнить, что электрический ток опасен, если неправильно и неумело им пользоваться.

Опасность электрического тока усугубляется тем, что во многих случаях его действие является неожиданным; он может оказаться не только на токоведущих частях, но и там, где его не должно быть. Действие тока на организм человека нередко заканчивается смертельным исходом.

Поражения электрическим током существенно отличаются от других видов производственных травм. Различают электрические удары, когда током поражается весь организм, и электротравмы, результатом которых являются местные внешние поражения тела — ожоги.

При электрическом ударе, когда ток проходит через тело человека, в большинстве случаев вначале нарушается дыхание, а сердце продолжает еще работать с нарушением своего ритма, затем может последовать остановка сердца. Степень опасности поражения электрическим ударом определяется силой тока, напряжением, продолжительностью нахождения человека под током и т. д.

Применяемый на промышленных предприятиях ток для освещения вызывает смертельное поражение. Безопасным считается напряжение не выше 36 В, а при работе в особо опасных условиях (когда возможность поражения увеличивается теснотой): в сырых помещениях, внутри резервуаров и аппаратов безопасным напряжением считается 12 В.

Большое значение имеет продолжительность нахождения пострадавшего под действием тока; очень важно быстро освободить пострадавшего от воздействия электрического тока. На исход поражения электрическим током влияет также и путь прохождения его через тело человека. Наиболее опасно прохождение тока через жизненно важные органы — сердце и легкие. Основными мерами защиты человека от поражения электрическим током является:

исправность и правильная эксплуатация электрооборудования пусковых механизмов и токоведущих частей;

защита от прикосновения к токоведущим частям;

защита от перехода напряжения на нетоковедущие части оборудования;

наличие блокировочных и сигнальных устройств, предупредительных плакатов и подписей;

применение индивидуальных защитных средств.

Необходимым условием недопустимости поражения током — ограждение токоведущих частей.

Для предотвращения опасных последствий от повреждения изоляции должно быть защитное заземление. Кроме заземления, для защиты от перехода напряжения на нетоковедущие части оборудования применяется защитное отключение. Это устройство автоматически в течение сотых долей секунды выключает электрический ток при переходе его на неметаллические части оборудования.

Большое значение для профилактики электротравматизма имеет наличие блокировочных и сигнальных устройств. Для профилактики электротравматизма широко используют предостерегающие, запрещающие, разрешающие и напоминающие плакаты.

Площадки, на которых производится наращивание электродов электропечей, загрузка их электродной массой должны быть деревянными или из других электроизоляционных материалов и не иметь сквозных металлических конструкций. В районе деревянной площадки не должно быть водоразборных кранов и любых других трубопроводов.

Электроды, электрощит должны быть отделены друг от друга изолирующими перегородками, исключающими возможность прикосновения обслуживающего персонала одновременно к двум электродам.

На площадке обслуживания печи должна быть световая сигнализация «печь включена», «печь отключена».

Работы с электродами на крыше руднотермических печей можно выполнять только при выключенной печи.

Для внутреннего осмотра печей и при ремонте их необходимо применять электролампы напряжением менее 12 В.

Взрывобезопасность. *Природный газ* применяется в качестве топлива и обладает токсичными свойствами. Допустимая норма содержания природного газа в воздухе рабочих помещений не должна превышать 300 мг/м^3 (в пересчете на углерод). Природный газ взрывоопасен. В связи с возможностью взрыва газовоздушной смеси необходимо предельно уменьшить его разрушительные последствия. Для этого в топках, боровах должны предусматриваться искусственно ослабленные места — взрывные клапаны.

Поверхность взрывных клапанов не регламентируется, однако минимальная его площадь должна быть не менее 0,05 м^2. Взрывные клапаны должны срабатывать при повышении рабочего давления не более чем в 1,5— 2 раза; их располагают в местах, исключающих поражение обслуживающего персонала и повреждение оборудования.

Печи должны быть оборудованы приборами для контроля за горением (ЗЗУ), за «соотношением газ — воздух» (первичный), за разрежением (давлением), за температурой в топочном пространстве и газовом тракте, а также системой автоматической остановки дутьевых вентиляторов и отсечки топливного газа при аварийной остановке дымососа.

Радиоактивное излучение. Радиоактивные изотопы используются для определения уровня фосфорита в шахтно-щелевых печах, для контроля за состоянием футеровки рудно-термических печей.

Установка и эксплуатация приборов с источниками радиоактивного излучения должны производиться в соответствии с санитарными правилами работы с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений.

Тепловое излучение. *Феррофосфор и шлак* являются отходами производства фосфора и имеют высокую температуру при сливе; они являются источниками сильного теплового излучения.

Под феррофосфорными летками в перерывах между их выпусками должен быть установлен ковш или предусмотрен аварийный желоб.

Под шлаковыми летками при периодическом сливе шлака в шлаковозы в перерывах между сливами необходимо постоянно иметь шлаковозы. Во избежание выхода феррофосфора через шлаковые летки, необходимо сливать его через установленные промежутки времени. При появлении вспышек в грануляционной воронке следует провести слив феррофосфора раньше времени. Пребывание вблизи от грануляционной воронки должно быть ограничено только абсолютно необходимым временем.

При сливе феррофосфора и его разливке в опоки, а также при сливе шлака обязательно следует носить защитные очки. Кроме того, рабочий, занятый работой непосредственно на летке, должен быть оснащен: защитным шлемом, рукавицами, очками, щитком для лица, кожаным фартуком.

При сливе феррофосфора нужно следить, чтобы он не контактировал с водой. Особенно опасно попадание воды, охлаждающей раму шлаковых леток, в лоток для стекания феррофосфора. Во избежание этого применяются специальные щитки. Блоки, образующие летку для слива феррофосфора, нужно регулярно проверять на износ и как можно скорее заменять новыми. Между самой глубокой точкой отверстия летки и нижней кромки блока углеродистый материал должен быть доброкачественным на расстояние не менее 100 мм, во избежание попадания фосфора в чашу, куда стекает вода из системы охлаждения печи.

Пожарная безопасность. Помещения, в которых установлены фосфорные электропечи, являются наиболее пожароопасными и они обеспечиваются средствами пожаротушения (ведра, лопаты, ящики с песком, огнетушители, кошма) в соответствии с действующими «Нормами первичных средств пожаротушения для производственных, складских, общественных и жилых зданий, утвержденными 4 февраля 1950 г. ГУ ПО МВД СССР».

Тушение горячего фосфора и фосфорного шлама должно осуществляться песком, пеной, гранулированным шлаком, навесной струей воды (исключая разбрызгивание фосфора и фосфорного шлама, которые являются источниками возникновения новых очагов горения). Для облегчения работ по ликвидации возникшего пожара, необходим свободный доступ к местам расположения пожарного инвентаря, которым пользуются до приезда пожарной команды. Поэтому не разрешается загромождать проходы между аппаратами, подходы к лестницам и дверям посторонними предметами. Ванны для тушения одежды, в случае ее воспламенения, должны быть всегда наполнены питьевой водой.

Оградительная техника. Все открытые вращающиеся и движущиеся части механизмов печей так же как зубчатые колеса, шестерни, редукторы, шкивы, ременные, цепные и другие передачи, валы, муфты и прочие устройства, которые могут нанести работающему травму, должны быть ограждены, если они расположены на высоте менее 2 м до уровня пола или рабочей площадки.

Для предохранения от падения противовесов плохо закрепленных подшипников, блоков и других деталей они должны быть тщательно огорожены.

Все находящиеся на высоте детали должны быть хорошо закреплены и за ними установлено постоянное наблюдение.

Запрещается производить ремонт, смазку и чистку оборудования с движущимися частями до их остановки.

В печах химических производств участвуют и получаются вредные вещества. Но причины возникновения опасностей хорошо известны, а главное разработаны проверенные на практике способы их предотвращения и ликвидации. Необходимо только знать соответствующие технологические регламенты, инструкции по технике безопасности, аварийные инструкции и точно их соблюдать, тогда работа будет безопасной и безвредной.

ЛИТЕРАТУРА

Амелин А. Г. Производство серной кислоты. М., «Химия», 1967. 472 с.

Антуфьев В. М. Эффективность различных форм конвективных поверхностей нагрева. М.—Л., «Энергия», 1966. 184 с.

Арсеев А. В. Сжигание природного газа. М., Металлургиздат, 1963. 407 с.

Аэров М. Э., Тодес О. М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. Л., «Химия», 1968. 510 с.

Баренбойм А. М., Галиева Т. М., Гинзбург Д. Б. и др. Тепловые расчеты печей и сушилок силикатной промышленности. М., Стройиздат, 1964. 497 с.

Бахшиян Ц. А. Трубчатые печи. М., «Химия», 1969. 312 с.

Беленький Е. Ф., Рискин И. В. Химия и технология пигментов. Изд. 2-е. Л., Госхимиздат, 1974. 656 с.

Бояринов А. И., Кафаров В. В. Методы оптимизации в химической технологии. М., «Химия», 1969. 564 с.

Ванюков А. В., Зайцев В. Я. Теория пирометаллургических процессов. М., «Металлургия», 1973. 504 с.

Ведь Е. И. Кладка и монтаж тепловых устройств в огнеупорной промышленности. Харьков — Москва, Металлургиздат, 1953. 179 с.

Вирозуб И. В., Лейбович Р. Е. Расчеты коксовых печей и процессов коксования. Киев, «Вища школа», 1970. 248 с.

Глинков М. А. Основы общей теории печей. М., Металлургиздат, 1962. 576 с.

Глозштейн Я. С., Карпов Д. В., Муромский Л. Н. и др. Использование газа в промышленных печах. Л., «Недра», 1967. 424 с.

Гузь С. Ю., Барановская Р. Г. Производство криолита, фтористого алюминия и фтористого натрия. М., «Металлургия», 1964. 239 с.

Дементьев В. М. Тепловые расчеты многозонных печей с кипящим слоем. М., «Металлургия», 1971. 183 с.

Дерешкевич Ю. В. Кислотоупорные сооружения в химической промышленности. М., Госхимиздат, 1960. 183 с.

Диомидовский Д. А. Металлургические печи цветной металлургии. М., «Металлургия», 1970. 702 с.

Дыбина П. В., Соловьева А. С., Вишняк Ю. И. Расчеты по технологии неорганических веществ. М., «Высшая школа», 1967. 522 с.

Забродский С. С. Высокотемпературные установки с псевдоожиженным слоем. М., «Энергия», 1971. 328 с.

Забродский С. С. Гидродинамика и теплообмен в псевдоожиженном слое М. — Л., Госэнергоиздат, 1963. 488 с.

Зуев В. Б., Михайлов В. В. Производство сажи. М., «Химия», 1970. 318 с.

Иванов Ю. В. Газогорелочные устройства. М., «Недра», 1972. 376 с.

Исламов М. Ш. «Труды Ленниигипрохима», 1972, вып. 6, с. 3—9, 1967, с. 366—370.

Исламов М. Ш. Термическое обезвреживание сточных вод и шламов. Л., изд. Ленниигипрохима, 1974. 76 с.

Исламов М. Ш. Газ. пром., 1965, № 4, с. 18—20.

Исламов М. Ш. Сушило терморадиационное для поверхностной сушки литейных полуформ на газовом топливе. Л., изд. ЛДНТП, 1967. 12 с.

Исламов М. Ш. Печи химической промышленности. Л., «Химия», 1969. 176 с.

Исламов М. Ш. «Труды Ленниигипрохима», 1973, вып. 1, с. 150—159.

Исламов М. Ш. В кн.: Техника сушки во взвешенном слое. Вып. 3. Изд. ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШа, 1966, с. 40—43.

Исламов М. Ш., Каганович Л. А., Цитович О. Б. В кн.: Материалы II Всесоюзного совещания по псевдоожиженному слою. Л., изд. Ленниигипрохима, 1971, с. 106—120.

Исламов М. Ш., Цитович О. Б. В кн.: Исследования в области химической электротермии. Л., изд. Ленниигипрохима, 1967, с. 366—370.

Кадаров В. К., Нудельман Б. И. Безбалочная центральная подача газа в шахтные печи. Ташкент, «Узбекистан», 1969. 60 с.

Казанцев Е. И. Промышленные печи. М., «Металлургия», 1964. 447 с.

Карабин А. И., Раменская Е. С., Энно И. К. Сжигание жидкого топлива в промышленных установках. М., «Металлургия», 1966. 371 с.

Китаев Б. И. Теплообмен в шахтных печах. М., Металлургиздат, 1957. 276 с.

Клевке В. А., Поляков Н. Н., Арсеньева Л. З. Технология азотных удобрений. М., Госхимиздат, 1963. 392 с.

Кнорре Г. Ф., Арефьев К. М., Блох А. Г. Теория топочных процессов. М. — Л., «Энергия», 1966. 472 с.

Козулин Н. А., Горловский И. А. Оборудование заводов лакокрасочной промышленности. Л., «Химия», 1968. 588 с.

Кривандин В. А., Молчанов Н. Г., Соломенцев С. Л. и др. Металлургические печи. М., «Металлургия», 1969. 615 с.

Кузьмин Г. А., Шварцштейн Я. В., Львова И. С. В кн.: Техническая и экономическая информация. Вып. 3, 4. М., изд. НИИТЭХИМ, 1966, с. 20—25.

Курюкин С. А. Системы газоснабжения предприятий. Гостоптехиздат, 1962. 291 с.

Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. М. — Л., Машгиз, 1957. 383 с.

Кушелев В. П. Основы техники безопасности на нефтеперерабатывающих заводах. М., «Химия», 1973. 295 с.

Линчевский В. П. Топливо и его сжигание. М., Металлургиздат, 1959. 400 с.

Локшин Ю. Х. «Труды Ленниихиммаш», 1971, № 6, с. 87—91.

Лыков А. В., Михайлов Ю. А. Теория тепло- и массопереноса. М. — Л., Госэнергоиздат, 1963. 536 с.

Ляпустина Е. М., Краковер С. Л., Римская Л. П. Хим. и хим. пром., 1962, № 1, с. 13—15.

Майзель Ю. А., Земельман В. Б., Баркан А. Б. Автоматизация производств фосфора и фосфорсодержащих продуктов. М., «Химия», 1973. 399 с.

Малец А. М. Хим. пром., 1959, № 1, с. 12—14.

Малин К. М. Хим. пром., 1956, № 2, с. 16—18.

Мастрюков Б. С. Теплотехнические расчеты промышленных печей. М., «Металлургия», 1972. 368 с.

Махорин К. Е., Тищенко А. Г. Высокотемпературные установки с кипящим слоем. Киев, «Техника», 1966. 189 с.

Михеев В. П. Сжигание природного газа в промышленных установках. М., Гостоптехиздат, 1962. 320 с.

Монастырев А. В. Производство извести. М., Стройиздат, 1972. 204 с.

Мухленов И. П., Добкина В. И., Дерюшкина В. И. и др. Технология катализаторов. Л., «Химия», 1974. 328 с.

Невский А. С. Теплопередача в мартеновских печах. М., Металлургиздат, 1963. 330 с.

Нечаев М. А. Техника безопасности в газовом хозяйстве промышленных предприятий. Л., «Недра», 1972. 136 с.

Огнеупорное производство. Справочник. Под ред. Д. И. Гавриша. Т. 1. М., «Металлургия», 1965. 578 с.

Пажи Д. Г., Прахов А. М., Равикович Б. Б. и др. Форсунки в химической промышленности. М., «Химия», 1971. 221 с.

Петров Г. В. Оборудование содовых заводов. Харьков, Изд. ХГУ, 1965. 326 с.

Печи общего назначения с вращающимися барабанами. Каталог-справочник Ленниихиммаша. Л., изд. ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШа, 1965. 56 с.

Печи химических производств. Л., «Машиностроение», 1971. 136 с.

Плотников Л. А. Огнеупоры в черной металлургии. М., «Металлургия», 1973. 273 с.

Позин М. Е. Технология минеральных удобрений. Л., «Химия», Изд. 4-е. 1974. 375 с.

Позин М. Е. Технология минеральных солей. Т. 1, 2. Изд. 4-е. Л., «Химия», 1974. 792 с.

Постников Н. Н. Термическая фосфорная кислота. М., «Химия», 1970. 303 с.

Постников Н. Н. «Электротермия», 1964, № 36, с. 3—29.

Померанцев В. В., Арефьев К. М., Ахмедов Д. Б. и др. Основы практической теории горения. Л., «Энергия», 1973. 246 с.

Ракин Л. Кладка и ремонт промышленных печей. М., «Московский рабочий», 1972. 204 с.

Ройтер В. А. В кн.: Катализ и катализаторы. Вып. 8. Киев, «Наукова думка», 1971, с. 3—10.

Рысс М. А. Печи с вращающейся ванной для производства ферросплавов. М., «Металлургия», 1964. 128 с.

Сафиулин В. И. Хим. пром., 1965, № 38, вып. 1, с. 16—18.

Свенчанский А. Д. Электрические промышленные печи. М. — Л., Госэнергоиздат, 1958. 288 с.

Свенчанский А. Д., Смелянский М. Я. Электрические промышленные печи. М., «Энергия», 1970. 264 с.

Серебренников С. С. Огнеупорная кладка промышленных печей. М., «Высшая школа», 1968. 319 с.

Скворцов Л. А., Акименко А. Д. Нагревательные устройства. М., «Высшая школа», 1965. 180 с.

Смоленский Л. А. Конвективные электропечи. «Энергия», 1972. 180 с.

Смуров В. С., Аранович Б. С. Производство сероуглерода. М. — Л., «Химия», 1966. 271 с.

Справочник конструктора печей прокатного производства. Под ред. В. М. Тымчака. Т. 1 и 2. М., «Металлургия», 1970. 575 с. и 992 с.

Справочник по огнеупорной кладке промышленных печей. М., Госстройиздат, 1960. 346 с.

Справочник сернокислотчика. Под ред. К. М. Малина. М., «Химия»,1971. 744 с.

Справочник строителя промышленных печей. М., Госстройиздат, 1952. 663 с.

Строганов А. И., Сергеев Т. Н., Сергеева Г. Н. и др. Дуговые электропечи. М., «Металлургия», 1972. 288 с.

Струнский Б. М. Руднотермические плавильные печи. М., «Металлургия», 1972. 368 с.

Тебеньков Б. П. Рекуператоры для промышленных печей. М., «Металлургия», 1967. 358 с.

Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод). М. — Л., Госэнергоиздат, 1957. 232 с.

Терновская А. Н., Коренберг Я. Г. Обжиг серного колчедана в кипящем слое. М., «Химия», 1971. 198 с.

Трофимов М. Г. Футеровка индукционных печей. М., «Металлургия», 1968. 285 с.

Федоров И. М. Теория и расчет процесса сушки во взвешенном состоянии. М. — Л., Госэнергоиздат, 1955. 175 с.

Чалых Е. Ф. Технология углеграфитовых материалов. М., Металлургиздат, 1963. 290 с.

Чепель В. М. Сжигание газов в топках котлов и печей и обслуживание газового хозяйства предприятий. Л., «Недра», 1969. 347 с.

Чернов А. В. Кладка промышленных печей и дымовых труб. М., Госстройиздат, 1960. 414 с.

Чернов В. Ф. Производство кальцинированной соды. М., Госхимиздат, 1956. 311 с.

Шварцман Л. А., Жуховицкий А. А. Начала физической химии для металлургов. М., «Металлургия», 1974. 352 с.

Шварцштейн Я. В., Кузьмин Г. А. Получение сернистого газа из элементарной серы. М., «Химия», 1972. 160 с.

Шорин С. Н. Теплопередача. М. — Л., Госстройиздат, 1952. 338 с.

Щукин А. А. Экономия топлива в черной металлургии. М., «Металлургия», 1973. 272 с.

Эфрос М. М. Нагревательные и термические печи на газовом топливе. М., «Металлургия». 260 с.

Эхельхайзер К. Эксплуатация промышленных печей, отапливаемых газом. М., Металлургиздат, 1961. 131 с.

Becher. Handbuch der Gasenwendung. Berlin. VEB Verlag technik, 1953. 456 S.

Becher. Der Gasbrenner. Berlin. VEB. Verlag. 1957. 359 S.

Horowitz I. Elektrowarme — Technik, 1953, Bd. 1, S. 35. G. Schmadt. Chem. Techn., 3, 1965, S. 157.

Агломерат 416
Азотопроводы 389
Антраценовая фракция 170
Антрацит 131
  активация в кипящем слое 240—244
  прокалка 111, 112
  регенерация в кипящем слое 240—244
Арки 299, 318—320

Балки пятовые, конструкции 339
Барит, восстановление 155—156
Башня для сжигания жидкого фосфора 74—76
Белила
  титановые 154—155
  цинковые 149 и сл.
Бетоны огнеупорные 283, 289, 293
  хромитовые глиноземистые 293
  шамотные 293
Борова 324 и сл.
  кладка 331, 332
  конструкция лазов 331
  прямоугольного сечения основные размеры (таблица) 330
  расчет сечения 332
  с лучковым сводом, основные размеры (таблица) 326
  с полуциркульным сводом основные размеры (таблица) 324, 325, 327, 328
  устройство вентиляции 329

Взрыв, определение 12
Воздухопроводы 299, 300, 389
  цилиндрические 322, 323
Выстилки 298

Газ(ы)
  дымовые 389, 395
  отходящие см. Отходящие газы
  печной 417, 418
Газ(ы)
  природный 420
    сжигание 16
  сжигание топка 276
  сжиженные 22, 23
    сжигание 16, 17
  теплотехнические характеристики (таблица) 21
Газойль каталитический, экстракты 384
  термо 169, 170, 384
  тяжелый каталитический 170
Газопроводы 387—389
  обвязочные, схемы 390—395
Глет 158
Горелки газовые 339 и сл.
  вихревые ГВП 353—357
  двухпроводные дутьевые 349—353, 355
    для сжигания высокотеплотворных газов 349—353
    для сжигания низкотемпературных газов типа ГН 353, 355
    размеры 353
    Стальпроекта ДВ 351—353
    Теплопроекта ГНП 349—351
  для нагрева изложниц 362, 363
  для сжигания
    в кипящем слое 357, 359
    природного и печного газа 369, 370
    хлора в струе водорода 369, 371
  запальные 371—373
  инжекционные среднего давления 341—349
    Теплопроекта ГИП 341—349
  керамические 359—361
  классификация 340, 341
  панельные ГБП 361—362
  погружного горения 365—368
    туннельные ВНИИГ 365—367

Горелки газовые
погружного горения циклонные ВНИИГ 366—368
трехпроводные 369, 370
фурменные периферийные 365
центральные пирамидальные 362, 364, 365
Горелочные камни 348

Динас 281, 288
ДКСМ печи 48, 55—58
конструктивные параметры 56
технологические показатели процесса обжига 57
Дымовые каналы 299, 300
Дымопроводы 398
цилиндрические 322, 323

Закон
Вика (смещения) 28
Гесса 9
Келлера 29
Киргофа 28
Ломберта 29
Планка 28
смещения см. закон Вика
Стефана — Больцмана 28—29
Запальник 373—375
Запально-защитное устройство (ЗЗУ) 373

Известковая пыль 416
Известняк 131
обжиг 179 и сл.
печи 179 и сл.
Измерение
плотность 27
полусферическая интенсивность 27
радиоактивное 420
тепловое 420, 421

Кальцинация (озоление) режим 90—91
Кальцинированная сода
производство 82 и сл.
печи 84 и сл.
Карбид кальция
производство 129 и сл.
печи 129 и сл.
Карбидные печи
герметичные с вращающейся ванной 146—149
конструкция механизма вращения ванны 146, 148
Карбидные печи
техническая характеристика 148, 149
герметичные со стационарной ванной 139 и сл.
ванна 141, 142
короткая сеть 141
крышка 142, 143
механизм перемещения электрода 153
механизм перепуска электрода 143
определение параметров 144—146
открытые 132
полузакрытые 133 и сл.
ванна 133
водоохлаждаемое перекрытие ванны 136, 137
загрузочные устройства ванны 137
заделка летки 133, 136
зонт 136
укрытие ванны 136
электроснабжение 137—139
Каркасы 337—339
Катализаторы
ванадиевые 197—200
сферические 200, 201
высокотемпературные 416
для конверсии окиси углерода 205 и сл.
на носителях 197
низкотемпературные 416
никелевые 209—212
плавленные 197
получаемые механическим смешиванием 197
печи 196 и сл.
производство 196 и сл.
Кислотостойкие материалы 282, 283, 286, 287
Кладка
арок 318—320
боровов 331, 332
сводов 318—320
стен 316—318
Клапан
взрывной 329, 331
отсечный 388, 389
Кожухи 334—337
защита 336—337
Кокс 131
Коксовый дистиллят 169
Колчедан (халькопирит)
обжиг 37 и сл.
материальный баланс 38, 39
печи 37 и сл.
тепловой баланс 39—40
свойства
технические (таблица) 36

Колчедан
физико-химические (таблица) 36
состав 35
Коррозия химическая стойкость защитных материалов (таблица) 290, 291

Литопон
производство 155 и сл.
печи 155 и сл.
прокалка 156—158
Лучистый поток 27
полусферический 27
Люминофоры
производство 173 и сл.
печи 174—179

Мазут
коэффициент теплопроводности 15
сжигание 268—274
печи 268—274
скрытая теплота плавления 15
теплоемкость 15
фильтрование 396
характеристики (таблица) 14, 16, 17
Мазутопроводы 395—397
Масло
антраценовое 170, 384
зеленое 169, 384
Мертели см. Огнеупорные растворы

Нагрев
индукционным методом 23
по методу сопротивления 17
электрической дугой 20, 23

Однозонные печи КС 48—55
методика расчета 52—54
показатели режима работы 51
расчет конструктивных размеров 54
техническая характеристика (таблица) 52
Огнеупорные материалы 282, 283
стойкость (таблица) 295
удельное электросопротивление (таблица) 298
характеристика (таблица) 284, 285
Огнеупорные обмазки 283, 293
Огнеупорные растворы (мертели) 283, 288, 289

Ожоги химические 418
Озоление см. Кальцинация
Окат 299
Окись углерода конверсия 205 и сл.
Откатная головка печи 220, 221
Отходы производств
сжигание 244 и сл.
методика расчета печей 261—263
печи 244 и сл.
твердые 244, 246
Отходящие газы, сжигание 259—261
печи 259—261

Паропроводы 398
Пековый дистиллят 385
Печь(и)
аэрофонтанные 43—45
с нижним подводом сырья 43—45
без применения постороннего топлива 170—172
ванные 34
вихревая 105—108
глетная второго обжига 158—160
горно 266, 267
Грум — Гржимайло 162—165
для сжигания жидкого фосфора 74—76
камерные 33, 62, 63, 249, 250, 259, 261
нагревательная переносная 263, 265, 267
электрическая ОКБ-210А
карбидные см. Карбидные печи
каркасы 337—339
карусельные 33
классификация 32—34
кожухи 334—337
КС см. Печи с кипящим слоем
муфельная 33, 70—72, 99—102, 150—152
с вращающимся барабаном 156—158, 227
трубчатая электрическая 175, 176
нагревательные камерные 263—265, 267
окислительная Клауса 239—240
плавиковые 77—82
полочные 33, 245, 247, 248
ретортная см. Ретортная печь
розжиг 411—412
руднотермические см. Руднотермические печи
с вращающимся барабаном 34, 92—94, 96—98, 103—105, 152—154, 165—169
аэродинамическое уплотнение 222, 223

Печь(и)
классификация 214, 215
методика расчета 227—234
муфельная 156—158, 227
наружным обогревом 77—80
непрямым нагревом 225—227
прямым нагревом 215 и сл.
с внутренним обогревом 80—82
с откатной головкой 217, 218, 220, 221
тепловой расчет 232, 233
электрические СБЗ/С 225—227
с двумя кипящими слоями Малеца см. ДКСМ печи
с кипящим слоем (КС) 34, 194—196, 241—244, 256—259
ДКСМ см. ДКСМ печи
однозонные см. Однозонные печи КС
распределительные решетки 243
с конветивно-радиационным нагревом 201—203
УРКС 48
синтеза хлористого водорода 64—69
методика расчета 66—69
со взвешенными частицами 34
содовая
вращающаяся См. Содовая печь вращающаяся
питатель 89
смеситель 89
суриковая периодического действия 160—161
сурика 408—411
схемы газоснабжения 388, 389
тигельные 33
трубчатые 33
муфельная электрическая 175—179
туннельные 34, 206, 208
ГИАП-11 209
ИК-1 205
ИК-2 205
ПТГ-1 209—214
электрическая 175—179
форсуночные 172, 173
фундаменты 332, 333
цианамидные см. Цианамидная печь
циклонные 58—62, 250—256
вертикальная 253—256
для сжигания кубового остатка 251—253
для сжигания токсичных отходящих газов 260—261
методика расчета 61—62
Печь(и)
шахтные см. Шахтные печи
щелевая двенадцатисекционная 108—110
электрические см. Электропечи
Печной газ 417, 418
Пигменты минеральные
белые 149 и сл.
желтые 158—161
красные 158—161
производство 149 и сл.
печи 149 и сл.
фиолетовые 161—169
черные 169—173
Плавиковая кислота
производство 76 и сл.
печи 77 и сл.
Подины 298
Предельно допустимые концентрации химических веществ (ПДК) 414—417
Проемы
в сводах 320—322
в стенах 320, 322
Пыль
известковая 416
содовая 416
электродной массы 416
Пятиокись ванадия 416
Пяты 299

Рабочие окна 299
Радиоактивное излучение 420
Реакции
обменного разложения 6, 7
окислительно-восстановительные 7
тепловой эффект 9
термического разложения 6
экзотермические 10
эндотермические 9, 10
Режимы проведения процессов в печах 10—13
Рекуператорная насадка 322
Рекуператоры 299
керамические 386, 387
радиационные 386
трубчатые 386
Реторная печь 112 и сл., 234—236
горелка 115
конструкция 112—115
многогорелочная 236
одногорелочная 235
режим
выгрузки 116, 117
гидравлический 118, 119
загрузки 116, 117
тепловой 117, 118
футеровка 115, 116
характеристика работы 116—119

Розжиг
печей на топливе
газовом 411—413
мазутном 413
Руднотермические печи 119 и сл.
см. также Карбидные печи
ванна 120—123
вывод газообразных продуктов 123, 124
КЗ-48ФМ 120
классификация 120
крышка 124, 125
летка
для феррофосфора 124
шлаковая 124
РКЗ-48-М1 120, 121
РКЗ-72Ф 120
система
охлаждения умягченной воды 129
циркуляции охлаждающей воды 128
техническая характеристика (таблица) 129
электроды 125
механизм перемещения 128
механизм перепуска 126, 127
устройство подачи электроэнергии 125, 126

Сажи печные
производство 196—173
печи 1
Светящиеся составы см. Люминофоры
Своды 299
кладка 318—320
устройство проемов 320—322
Сера
сжигание 58—63
печи 58—63
технические условия (таблица) 36
физико-химические свойства (таблица) 35
Серная кислота 418
производство 34 и сл.
печи 34 и сл.
Сернистый газ (ангидрид)
получение 34
сырье 34 и сл.
токсичность 416, 417
Серный ангидрид 417
Сероводород 417
Серопроводы 396, 398
Сероуглерод
производство 234 и сл.
печи 234 и сл.
Содовая печь вращающаяся
материальный баланс 92—93
методика расчета 90—94
тепловой баланс 93—94
Содовая пыль 416
Соляная кислота, производство 63, 64
Сопла дутьевые, конструкция 50
Сплавы жароупорные (таблица) 334, 335
Стены 298, 299
кладка 316—318
устройство проемов 320, 322
Сточные воды
сжигание 249 и сл.
печи 249 и сл.
Стройматериалы
пористые
теплопроводность (таблица) 296
Сульфат натрия
получение 69—72
печи 69—72
Сульфид железа, физико-химические свойства 35
Сульфид натрия
получение плава 98 и сл.
печи 98 и сл.
Сурик 158
Сушка печей 408—411

Тепловой эффект химической реакции 9
Теплоизоляционные материалы 283
основные свойства (таблица) 292
Теплообмен
излучением 27—29
конвективный 26—27
Теплопроводность 24—26
Термическая обработка материалов 8
Токсические свойства химических веществ 414—418
Топки 268 сл.
классификация 268
круглые 269—272
определение
длины камеры 279, 280
объема камеры 276—279
прямоугольные 268—269
с выносной камерой горения 268, 270
с рециркуляцией дымовых газов 274, 276
циклонные 270, 273, 274
Топливо
газообразное 16
основные расчетные формулы (таблица) 18, 19
состав (таблица) 20
жидкое 14, 15
определение 13
твердое 14
Трубопроводы 378 и сл.

Трубы дымовые 398—402
определение основных размеров 400—401

Ультрамарин
получение 161 и сл.
обжиг шихты 164—169
печи 161 и сл.
Уравнение
Аррениуса 9
Ньютона 24
Фурье — Кирхгофа 25

Феррофосфор 420, 421
Фильтр для мазута
малый 396
пластинчатый 396, 397
Форсунки 380, 381
мазутные 339, 375 и сл.
двухступенчатые большие (ФДБ) 377, 379, 380
двухступенчатые малые (ФДМ) 376, 377
классификация 376
Оргэнерго, одноступенчатые модернизированные (ФООМ) 377, 378, 380
Стальпроекта 380, 381
механические 384, 385
серные 339, 384, 385
сырьевые 384—386
для циклонной печи 385, 386
для цилиндрической печи 385—387
фосфорные 339, 381—383
ЛенНИИХиммаш 382
НИУИФ 383
Фосфор
возгонка 119 и сл.
желтый 414—415
производство 108 и сл.
печи 108 и сл.
сжигание 74—76
печи 74—76
Фосфористый водород 417
Фосфорная кислота термическая 418
производство 72 и сл.
печи 74—76
Фосфорный ангидрид 417
Фундаменты 332, 333
Футеровка 281 и сл.
боровов 324 и сл.
кислая 297
наружная 282
нейтральная 297
определение 282

Футеровка
определение толщины 300—307
основная 297
правила кладки 314 и сл.
расчет(ы) 300 и сл.
на изгиб 312
на срез 311, 312
по раскрытию швов 313, 314
прочности 307 и сл.
устойчивости 312, 313
требования к качеству 315
цилиндрических
воздухопроводов 322, 323
дымопроводов 322, 323
Футеровочные материалы 282 и сл.

Халькопирит см. Колчедан
Хлорид бария
получение плава 102—105
печь 103—105
Хлористый водород
получение 64 и сл.
печь 64—69
Хромит 293

Цианамидная печь
вращающаяся 96—98
к непосредственной загрузкой шихты 95—96
Циклон НИИОГАЗ ЦН-15 188

Шамот 281, 282, 293
Шахтные печи 33
многозонные 199, 200, 203, 204
методика расчета 212—214
пересыпные
выгрузочное устройство 185, 186
загрузочное устройство 183, 184, 188, 189
на газовом топливе 185 сл.
на твердом топливе 181—185
с центральной газовой горелкой 190—194
Швы
перевязка 315
температурные 316
конструкции 317
Шиберы 299, 300
дымовые 402—405
водоохлаждаемые 403, 405
керамические 403, 405
металлические 403, 404
поворотные 403, 404

Шлак 420
из фосфорных печей 416
Шлам, сжигание 245—248
печи 245—248, 258
технические характеристики 248

Электробезопасность 418—420
Электропечь(и) см. также Руднотермические печи

Электропечь(и)
камерная ОКБ-210А 174, 175
муфельная (трубчатая) 175, 176
с вращающимся барабаном СБЗ/С 225—227
сопротивления 237—239
методика расчета 239
однофазные 237
трехфазная 237, 238
туннельная ЦЭП-375А 175—179

Мансур Шаихович Исламов

ПЕЧИ ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Редактор З. И. Грива
Техн. редактор З. Е. Маркова
Переплет художника Л. А. Яценко
Корректор Г. А. Рябинина

М-18483. Сдано в наб. 20/II 1975 г.
Подп. в печ. 26/VI 1975 г. Формат бумаги 60 × 90¹/₁₆.
Бумага тип. № 2. Усл. печ. л. 27. Уч.-изд. л. 30,52.
Тираж 5000 экз. Заказ 104. Изд. № 603. Цена 1 р. 69 к.

Издательство «Химия», Ленинградское отделение
191186, г. Ленинград, Д-186, Невский пр., 28

Ленинградская типография № 6 Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
196006, г. Ленинград, Московский пр., 91