

Д.Б. Гинзбург, С.Н. Деликишкин,
Е.И. Ходоров, А.Ф. Тижский

ПЕЧИ И СУШИЛА СИЛИКАТНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ

Доктор техн. наук Д. Б. ГИЗБУРГ,
кандидат техн. наук С. Н. ДЕЛИКИШКИН, кандидат техн. наук
Е. И. ХОДОРОВ, инженер А. Ф. ЧИЖСКИЙ

21559ф

66.04
П-31
764.62

ПЕЧИ И СУШИЛА СИЛИКАТНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

*Допущено Министерством высшего обра-
зования СССР в качестве учебника для
студентов вузов по специальности «Техно-
логия силикатов»*

Под редакцией
действительного члена АН УССР
П. П. БУДНИКОВА

Фильм
Научно-учебной
библиотеки КПИ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО ЛИТЕРАТУРЫ
ПО СТРОИТЕЛЬНЫМ МАТЕРИАЛАМ

ПРОВЕРЕНО 54

Москва — 1949

mp

Книга «Печи и сушила силикатной промышленности» является учебником для учащихся вузов. В ней рассматриваются основы теории печей, устройство печей, учение о движении газов, вопросы сжигания и газификации топлива, элементы печей и основы их расчета.

Кроме того, в книге описываются печи, применяемые в различных отраслях силикатной промышленности, газогенераторы и сушилки и контроль их работы, а также приводятся данные, необходимые для выполнения курсового проекта.

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка		Напечатано	Следует читать
	снизу	сверху		
49		24	$\left(\frac{T_k}{T_g}\right)^{3,6}$	$\left(\frac{T_k}{T_g}\right)^{3,6}$
135		4	газогенераторов	газогенераторов
226		23	кал/кг град	кал/кг
234		17	W_1	w
248		10	см/сек. г.	см сек/г
310		8 и 9	Q	Q^1
353	16		кал/м ³ час град.	кал/м ³ час
354	подпись к рис. 125		1,35 × 6,0 м × 10 мм	1,35 × 6,0 м × 10
354	13		кал/м ³ час град.	кал/м ³ час
359		1	пропорциональна	, пропорциональная
360		15	(31)	(31 глава III)
360		16	(32) и (35)	(32 глава III) и (35 глава III)
365		9	т. т. Рожкова, Козак, Трофимова, Шарабан	т. т. Н. И. Рожкова, А. П. Козак, П. В. Трофимова, А. Е. Шарабан
381	1		$\left(\frac{Q}{F}\right)^{21}$	$\left(\frac{Q}{F}\right)^2$
383	10 и 9		} δ	d
384		2 и 3		
390	1		фосфор,	фосфо-
392		8	квт	квтч
393		17	подобным	подсобным
424		5	< 0,1	< 0,5
448		21	39	45
464		4	$+ H_{cm}^2 V_{ce}^2$	$- H_{cm}^2 V_{ce}^2$

Расход технологического топлива и его удельный вес в себестоимости продукции силикатной промышленности

Вид продукции	Метод производства (основная стадия)	Удельный расход топлива на технологические пущды		Стоимость технологического топлива в % себестоимости продукции
		в кал/кг	в кг условного топлива/кг	
Листовое стекло Бутылочное стекло Сортное стекло	Варка в ванной печи	6300	0,9	7
	» » » »	4900	0,7	14
	Варка в горшковой печи	17500	2,4	19
Шамот ²	—	2030	0,29	12,2
Даназ ²	—	2350	0,336	16,5
Магнезитовый кирпич	Обжиг в шахтной или в газокамерной печи	4800	0,684	28,6
Каустический магнезит	Обжиг во вращающейся печи	2120	0,302	34,6
Металлургический порошок	Обжиг в шахтной печи	2840	0,405	29,2
Доломит обожженный	То же	2400	0,312	24,8
Известь строительная	»	1200	0,171	16
Портландцемент	Обжиг во вращающейся печи	2400	0,343	25
	Обжиг в шахтной печи	1200	0,171	25

¹ По всем операциям производства.

² На обезличенную тонну.

Основы теории печной техники впервые были разработаны в России М. В. Ломоносовым. В своей диссертации «О вольном движении воздуха в рудниках примеченном» (1742) он объяснил причины естественного движения газов выдавливанием теплых газов тяжелым холодным воздухом. Это положение было в дальнейшем положено в основу теории движения газов в печах и конструирования печей. Работы М. В. Ломоносова были продолжены и развиты многими русскими и советскими учеными, в частности В. Е. Грум-Гржимайло, М. А. Павловым и Н. Н. Доброхотовым, усовершенствовавшими теорию печей и газогенераторов.

Созданная в России и непрерывно развиваемая советскими учеными теория печей является самой передовой в мире.

Глава первая ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ О ПЕЧАХ

1. ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ В ПЕЧАХ

Печи называются технологические аппараты, предназначенные для получения продукта с определенными техническими свойствами из исходных материалов путем тепловой обработки. Печь представляет собой технологическую установку, в которой под действием высокой температуры и газовой среды протекают сложные физико-химические процессы.

В печах силикатной промышленности протекают следующие основные процессы: нагрев, сушка, расплавление, разложение, сплавление, варка. Нагревание материала до температуры ниже точки плавления, не сопровождающееся изменением его химического состава, производится с целью сушки материала и изменения его физической структуры (отжиг, закалка, размягчение, перекристаллизация).

Нагревание веществ до температуры ниже точки плавления, сопровождающееся изменением их химического состава, имеет целью удаление углекислоты (обжиг известняка), гидратной влаги (обжиг гипса) и т. п. Часто этот сложный процесс сопровождается рядом других, например изменением структуры материалов и частичным плавлением их. Так, при обжиге сырья в огнеупорно-керамическом производстве последовательно происходят сушка материала, удаление гидратной влаги, образование сложных силикатов и алюминатов и спекание.

Указанные процессы, связанные с разложением материала, обычно обобщают термином «обжиг»¹.

Нагревание материала выше температуры плавления, не сопровождающееся изменением его химического состава — расплавление, — производится в целях получения изделий определенной формы.

Сплавление материалов с образованием определенного химического соединения происходит при многих технологических процессах.

¹ В химической и топливперерабатывающей промышленности под обжигом понимают нагрев, сопровождающийся процессами окисления, восстановления и соединения веществ, а также процессами, связанными с пирогенетическим разложением топлива.

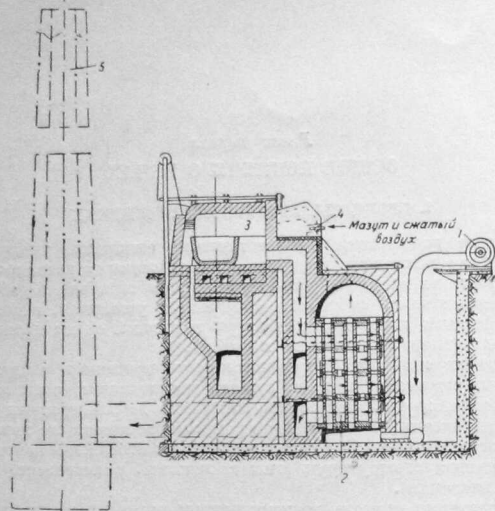


Рис. 1. Схема печной установки.

Весьма сложен процесс варки стекла, под которым следует понимать совокупность процессов сушки, разложения, образования сложных веществ, расплавления и растворения. Свойства образовавшегося продукта при этом совершенно отличны от свойств исходных материалов.

В общем случае печная установка состоит из следующих частей: собственно рабочей камеры, топочного или горелочного устройства, приспособлений для использования тепла отходящих газов и дутьевого, насосного и тягового устройств. В рабочей камере протекает основной технологический процесс, для осуществления которого создана печь. В топочном или горелочном устройстве подготавливается источник тепла, которое нужно передать материалу или изделию для проведения технологического процесса. Это может быть топка или приспособление, распыливающее жидкое топливо или смешивающее вводимые топливо и воздух. В частях печи для использования тепла отходящих газов подогреваются воздух и горючий газ. Кроме того, отходящие газы могут быть использованы для подсушки или подогрева материалов, нагрева воды, получения водяного пара и т. д.

Дутьевые устройства и насосы используют для подвода воздуха и топлива под давлением в печь. Тяговые устройства служат для отвода дымовых газов.

На рис. 1 показана схема печи. Воздух подается вентилятором 1 в воздухонагреватель 2 и оттуда (подогретый) в рабочую камеру 3. В последнюю форсункой 4 подается также жидкое топливо, которое нагнетается насосом и распыливается с помощью сжатого воздуха, подаваемого компрессором. Отходящие газы отводятся дымовой трубой 5 из рабочей камеры через воздухонагреватель.

2. УСТРОЙСТВО И РАБОТА ПЕЧЕЙ

В зависимости от метода производства и характера протекающих процессов применяют печь того или иного типа. Большое значение имеет агрегатное состояние (твердое, жидкое, газообразное) исходных материалов и получаемого продукта и вид изделий (формованные или не формованные). В зависимости от протекающих в печи процессов различают: сушильные, выпарные, отжигательные, закалочные и обжигательные печи, печи для пирогагетической переработки топлива, возгонки, сплавления, плавильные и для варки. Ввиду специфичности устройства и режима работы сушильные печи обычно выделяют в самостоятельную группу, называемую сушилками.

Печи, применяемые в отдельных отраслях промышленности, обычно дополнительно подразделяют по частным признакам. Такими признаками являются: режим — тепловой (распределение температур, постоянство отопления) или технологический (периодическая и непрерывная работа), способ использования теряющегося тепла (регенеративные и рекуперативные печи, печи с рециркуляцией дымовых газов, с использованием тепла продукта и т. д.), способ обслуживания (ручное, полностью или частично механизированное), вид топлива (твердое, жидкое, газообразное). Эти признаки обычно используют избирательно в общих и частных классификациях в соответствии со значением их для отдельных производств или отраслей промышленности, применительно к которым составляется классификация.

Температурный и тепловой режимы печей

По тепловому режиму различают следующие группы печей: а) с постоянными во времени температурным и тепловым режимами (непрерывно действующие туннельные обжигательные и ванне-стекловаренные печи, а также непрерывно действующие сушилки);

б) с постоянным температурным и переменным тепловым режимами (печи непрерывного действия с периодической загрузкой);

в) с переменным температурным и постоянным тепловым режимами (кольцевые печи);

г) с переменным температурным и тепловым режимами (печи периодического действия).

Источники тепла

Обычно тепло, необходимое для нагревания материалов и покрытия затрат на протекание реакций, нагрев продуктов горения и возмещение потерь в окружающую среду, выделяется в результате сжигания топлива или использования электрической энергии. В зависимости от вида источника тепла различают следующие типы печей: а) на твердом топливе; б) на пылевидном топливе; в) на жидком топливе г) на газовом топливе; д) электрические.

Передача тепла

По способу передачи тепла в печах, отапливаемых обычными видами топлива, различают:

1. Печи, в которых тепло передается обрабатываемому материалу за счет сжигания твердого топлива, смешиваемого с материалом (рис. 2, а).

Тепло передается материалу от раскаленного топлива (излучением и теплопроводностью) и продуктов горения топлива (излучением и конвекцией).

К числу подобных печей относятся многие шахтные печи (известковообжигательные, доменные, вагранки и др.). Иногда эти печи (например, известковообжигательные) называют персыпными.

2. Печи, в которых тепло передается обрабатываемому материалу от газообразных продуктов горения топлива (рис. 2, б).

Эти печи называют пламенными. Газы проходят между кусками материала или омывают его сверху. Передача тепла материалу происходит, главным образом, излучением от пламени, стен и свода печи и отчасти конвекцией от газов.

К этой группе относятся большинство печей. Примером могут служить горшковые и ваннные стекловаренные печи, одно- и многокамерные, а также кольцевые и туннельные печи огнеупорно-керамической промышленности, сталеплавильные печи и т. д.

3. Печи, в которых тепло передается обрабатываемому материалу через стенки камер или сосудов, в которых он находится (рис. 2, в).

Передача тепла материалу происходит, главным образом, излучением от стенок камер или сосудов, теплопроводностью при соприкосновении со стенками и конвекцией от газов, находящихся в камере и нагреваемых от стен. Часто эти печи подразделяют на муфельные, служащие для нагрева или обжига, и ретортные, в которых обрабатывается материал (обычно разложение)

с улавливанием газо- и парообразных продуктов вне печи. Такое подразделение не всегда выдерживают. Иногда муфельными называют также печи с улавливанием получаемых газообразных продуктов. Примером муфельной печи может служить печь для обжига живописной керамики, а ретортной — печь с ретортами для сухой перегонки угля.

4. Печи, в которых тепло выделяется в обрабатываемом материале в результате протекания экзотермических реакций.

В этих печах реагирующие частицы материала, температура которых повышается, передают свое тепло соседним частицам теплопроводностью и излучением. В случае выделения газов при реакции, тепло передается материалу также излучением и конвекцией от газов.

К подобным печам относятся некоторые печи химической и металлургической промышленности, в частности, печи для обжига сульфидных руд.

Если выделяющегося тепла недостаточно для протекания процесса, которое дополнительное количество его подводит за счет сжигания топлива.

5. Электрические печи, в которых тепло передается материалу излучением от вольтовой дуги или сопротивления, теплопроводностью от сопротивления, конвекцией и излучением от газов, нагреваемых сопротивлением, излучением

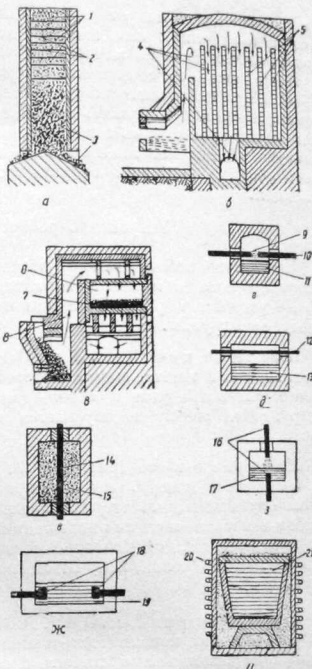


Рис. 2. Схемы обжига печей:
а — персыпная печь, б — пламенная печь, в — муфельная печь, г — электрическая дуговая печь, д, е — электрические печи с косвенным сопротивлением, жз — электрическая печь с непосредственным сопротивлением, и — электрическая печь смешанного обогрева (дуговая и сопротивление), и — индукционная печь.
1 — Сварь, 2 — топливо, 3 — продукт, 4, 8 — топливные газы, 5, 7, 11, 15, 15, 17, 19 — материалы, 6 — муфель, 9 — электрическая дуга, 10, 16, 18 — электроды, 13, 14 — электрическое сопротивление, 20 — обмотка, связанная с генератором тока высокой частоты, 21 — газы.

и теплопроводностью от стенок, нагреваемых сопротивлением (как и в муфельях), или, наконец, вследствие прохождения тока непосредственно через материал. Соответственно различают печи дуговые (рис. 2, г), сопротивления (рис. 2, д, е, ж), индукционные (рис. 2, и) и смешанного обогрева (рис. 2, з). Примерами электрических печей могут служить дуговая печь и печь сопротивления для варки стекла, печь сопротивления для обжига фарфора или огнеупоров, индукционная сталеплавильная печь и печь смешанного обогрева (дуговая и сопротивления) для получения карбида кальция.

Устройство рабочей камеры

Устройство рабочей камеры отражает сущность технологического процесса и является характерным признаком печи.

По устройству рабочей камеры печи можно подразделить на следующие группы.

Шахтные печи (рис. 3, а). Основная рабочая камера представляет собой шахту, высота которой превышает поперечник не менее чем в 1,5 раза и обычно значительно более. Материал загружается сверху и опускается под влиянием собственного веса.

Камерные печи (рис. 3, б, в). Рабочее пространство представляет собой камеру, ограниченную постоянными или временными ограждениями. Материал насыпают в камеру или выкладывают в ней высоким слоем в виде правильных рядов. Камерные печи применяют в виде отдельных самостоятельных печей (рис. 3, б) или соединяют в блок, получая многокамерные и кольцевые печи (рис. 3, в).

Подовые печи (рис. 3, г)¹. Рабочая камера снабжена одним или несколькими подами (одно- и многоподовые печи), на которых материал располагается тонким слоем.

Барабанные вращающиеся печи (рис. 3, д). Рабочая камера вращающейся печи представляет собой горизонтальный или слегка наклонный барабан. Перемещение и перемешивание материала достигается вращением барабана. При большой длине эти печи называют трубчатыми.

Туннельные печи (рис. 3, е). Рабочая камера представляет собой горизонтальный канал большой длины. Материал передвигается в вагонетках или на транспортерах.

¹ Подовые печи являются разновидностью камерных. Ввиду резкого конструктивного отличия, печи, называемые в технике «подовыми», выделены в самостоятельную группу.

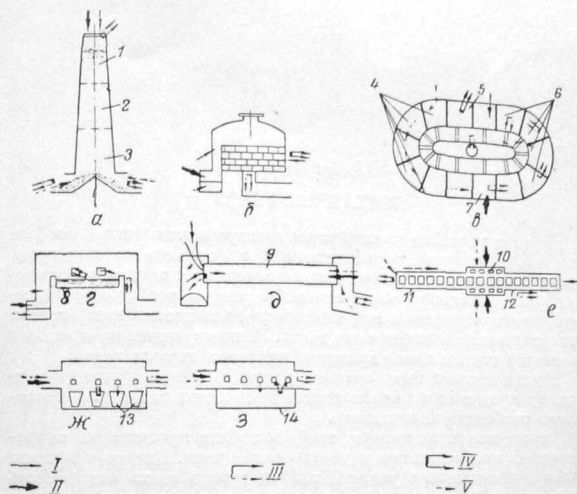


Рис. 3. Схемы рабочих камер печей:
а — шахтная печь, б — однокамерная печь, в — многокамерная печь, г — подовая печь, д — барабанная вращающаяся печь, е — туннельная печь, ж — горшковая печь, з — ванная печь.

1 — зона подогрева, 2 — зона обжига, 3 — зона охлаждения продукта, 4 — камеры на охлаждении, 5 — выгрузка, 6 — камеры на нагреве, 7 — камера на обжиге, 8 — под, 9 — барабан, 10 — зона обжига, 11 — зона охлаждения продукта, 12 — зона подогрева материала, 13 — горшок, 14 — ванна, 1 — подача материала, 2 — подача топлива, 3 — отвод отходящих газов, 4 — отвод продукта, 5 — подвод воздуха.

Горшковые или тигельные печи (рис. 3, ж). Рабочее пространство представляет собой камеру, в которой расположены сосуды — горшки. Продукт получается в горшках в расплавленном состоянии.

Ванные печи (рис. 3, з). Рабочее пространство представляет собой камеру с нижней частью в виде ванны (бассейна), в которой продукт находится в расплавленном состоянии.

МЕХАНИКА ГАЗОВ

Во всех печах, за исключением электрических, тепло, необходимое для нагрева обрабатываемых материалов и подогрева воздуха для горения и горючего газа, отдается продуктами горения. Для успешной работы печной установки необходимо надлежащее распределение в ней температур, что достигается сменой теплоносителя, обычно печных газов. Поэтому одним из основных элементов теории печей является механика печных газов.

В печи должны быть созданы условия, обеспечивающие подвоз, пропуск и отвод необходимого количества газов, т. е. достижение необходимой мощности.

Расчет величины напора, требуемого для преодоления сопротивлений, необходимо при проектировании печи. Вместе с тем для выбора оптимальных условий работы нужно знать зависимость теплоотдачи от скорости и направления движения газа. Это движение должно быть осуществлено также в соответствии с технологическими требованиями к протеканию процесса.

Впервые в истории техники вопросы, связанные с движением газов в печах, начали изучать русские ученые. Еще в XVIII веке М. В. Ломоносов вывел основные законы естественного движения подогретых газов. Учение о механике газов, применительно к печам, впервые было развито В. Е. Грум-Гржимайло и в дальнейшем Н. Н. Доброхотовым. В последние годы вопросы движения газов углубленно изучают многие советские ученые.

1. СВОЙСТВО ГАЗООБРАЗНЫХ ТЕЛ

Основное различие между газовой и капельно-жидкой средой заключается в том, что капельная жидкость является практически не сжимающейся, тогда как газообразное тело, в зависимости от давления и температуры, значительно меняет свой объем.

Однако, в полостях промышленных печей газы находятся под давлением, близким к атмосферному, что позволяет пренебречь влиянием давления и применить для них законы гидравлики капельных жидкостей.

Различают идеальные и реальные газы. Идеальные газы обладают абсолютной подвижностью и не оказывают сопротивления изменению формы и разрыву. В реальных газах могут возникать

сжимающие, растягивающие и, что особенно важно, касательные усилия.

Касательные усилия возникают вследствие трения газа о поверхность, в которых он движется (внешнее трение), и трения между частицами газа (внутреннее трение), т. е. вследствие скольжения одних частиц по другим и замедления или ускорения их движения в результате увлечения частиц друг другом.

Коэффициент вязкости μ (или коэффициент динамической вязкости) имеет размерность $\text{кг сек}^2/\text{м}^2$. В физике единицей измерения для коэффициента вязкости является пуаз, равный $1 \frac{\text{дина сек}}{\text{см}^2}$. Пересчет на техническую систему мер производится по формуле:

$$1 \text{ пуаз} = 0,0102 \frac{\text{кг сек}}{\text{м}^2}.$$

Иногда рассматривают также величину коэффициента кинематической вязкости ν :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \text{ м}^2/\text{сек}.$$

где ρ — плотность газа в $\frac{\text{кг сек}^2}{\text{м}^4}$.

Вязкость газов сильно растет с температурой.

2. Некоторые законы, применяемые в механике газов

Уравнение равновесия газов. Для покоящегося газа с объемным весом γ_g , находящегося в открытом снизу сосуде (рис. 4), т. е. сообщаемого снизу с воздухом при давлении p_1 на уровне точки 1, давление p_2 на уровне точки 2 равняется:

$$p_2 = p_1 - H\gamma_g. \quad (1)$$

Снаружи сосуда давление атмосферного воздуха с объемным весом γ_a на уровне точки 2 составляет:

$$p_2 = p_1 - H\gamma_a, \quad (2)$$

$$p_2 - p_2 = \Delta p = -H(\gamma_g - \gamma_a). \quad (3)$$

Уравнение неразрывности струи. При установившемся движении через любое сечение трубки в единицу времени проходит равное весовое количество газа. Обычно в одном и том же сечении трубопроводов температура, ско-

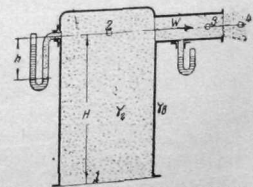


Рис. 4. Схема движения нагретого газа.

рость и давление переменны, и уравнение неразрывности применяется для средних значений скорости, давления и удельного веса.

Если площади сечения трубопровода ω_1 и ω_2 и соответственно средние скорости и удельные веса газов w_1, γ_1 и w_2, γ_2 , то должно существовать равенство:

$$\omega_1 w_1 \gamma_1 = \omega_2 w_2 \gamma_2 = \text{const кг/сек.} \quad (4)$$

При постоянстве удельных весов объемы протекающих газов равны, т. е.

$$\omega_1 w_1 = \omega_2 w_2 = V = \text{const м}^3/\text{сек.} \quad (4а)$$

и

$$w_1 = \frac{V}{\omega_1}. \quad (5)$$

Применительно к печным установкам, в которых газы движутся в подостях, имеющих незначительно плотные ограждения — из кирпича и снабженные отверстиями, следует учитывать подсос воздуха (или других газов) снаружи и выбивание газов изнутри наружу. Если обозначить через ΔV м³/сек. количество подсаваемого или утекающего газа, γ_1, γ_2 и $\gamma_{с.м}$ кг/м³ удельный вес соответственно текущего газа, присасываемого газа и газовой смеси, и G_1 — вес протекающей в сечении 1 смеси, то вместо уравнения неразрывности струи будем иметь следующие уравнения:

$$\gamma_1 w_1 w_1 = G_1 \text{ кг/сек.}, \quad (4б)$$

$$\gamma_{с.м} \omega_2 w_2 = G_1 + \gamma_2 \Delta V \text{ кг/сек.}, \quad (6)$$

где ΔV берется со знаком плюс в случае присоса газов снаружи и со знаком минус в случае утечки газов из газопровода.

Уравнение движения жидкости. На движение газов в печных установках влияет подвод тепла и изменение удельного веса газов.

Применительно к движению газов в каналах печей и паровых котлов вопросы, связанные с динамикой жидкостей при установившемся движении, были исследованы Н. Н. Доброхотовым, Л. К. Рамзиным, В. Е. Грум-Гржимайло, Г. П. Иванцовым, В. Н. Тимофеевым и др.

Для бесконечно малого участка пути по принципу сохранения энергии для 1 кг газа можно написать уравнение:

$$dq = dU + Ady + Ad \frac{w^2}{2g} + Ad(pv), \quad (7)$$

согласно которому бесконечно малое количество тепла dq , сообщаемого газу, расходуется на приращение внутренней энергии газа $dU = c_v dT$, преодоление работы силы тяжести Ady (где y — вертикальные координаты центров тяжести соответствующих сечений канала, A — тепловой эквивалент работы), приращение кинетической энергии газа — $Ad \frac{w^2}{2g}$ и внешнюю работу $Ad(pv)$. При наличии трения работа трения R (кгм на 1 кг газа) превращается

в тепло. Общее количество тепла, сообщенное газу равно:

$$dQ = dq + AdR$$

и уравнение движения газа приобретает следующий вид:

$$dQ = dU + Ady + Ad \frac{w^2}{2g} + Ad(pv) + AdR. \quad (8)$$

При скоростях, имеющих место в печных установках, в балансе энергии расход тепла на ускорение газа и работу сил трения очень мал сравнительно с расходом тепла на нагрев газа.

Поэтому тепловой сторона вопроса и вопросы превращения напоров рассматриваются самостоятельно. При расчете сопротивлений движению газов следует учитывать влияние нагрева газа.

Для горизонтального канала уравнение движения имеет следующий вид:

$$\frac{dw^2}{2g} + \frac{dp}{\gamma} + dR = 0. \quad (9)$$

Величина скорости газа в уравнении (9) при заданном весовом расходе газа зависит от сечения трубопровода и температуры газа.

Если канал расширяется, причем подвод тепла распределен так, что скоростной напор остается неизменным, то давление затрачивается только на преодоление сопротивления от трения. Гораздо большее значение имеет случай трубопровода постоянного сечения. Если температура и скорость возрастают с T_1 и w_1 до T_2 и w_2 , то давление падает с p_1 до p_2 , причем

$$w_1 = w_2 \frac{T_1}{T_2}; \quad (10)$$

$$\gamma w = \gamma_1 w_1 = \gamma_2 w_2 = \text{const}; \quad (11)$$

$$\gamma_2 = \frac{\gamma_1 T_1}{T_2}. \quad (12)$$

При отсутствии трения ($R = 0$), получаем:

$$-dp = \gamma w \frac{dw}{g} \quad (13)$$

и после интегрирования

$$p_1 - p_2 = \frac{\gamma_1 w_1^2}{g} (w_2 - w_1) = \frac{\gamma_2 w_2^2}{g} - \frac{\gamma_1 w_1^2}{g} \quad (14а)$$

или

$$p_1 - p_2 = 2 \left(\gamma_2 \frac{w_2^2}{2g} - \gamma_1 \frac{w_1^2}{2g} \right). \quad (14)$$

Для негоризонтального канала с вертикальными координатами центра тяжести начального и конечного сечений y_1 и y_2 получаем:

$$-dp = \gamma w \frac{dw}{g} + \gamma dy. \quad (15)$$

Интегрирование дает:

$$p_1 - p_2 = \frac{\gamma_0 \omega_1^2 - \gamma_1 \omega_2^2}{g} + \int_{y_1}^{y_2} \gamma dy. \quad (16)$$

Если принять линейное изменение температуры в канале по закону

$$T = a + by \quad (17)$$

то

$$dy = \frac{dT}{b} \quad (18)$$

и

$$\int_{y_1}^{y_2} \gamma dy = \int_{T_1}^{T_2} \gamma_0 \frac{273}{T} \cdot \frac{dT}{b}. \quad (19)$$

Интегрирование дает:

$$\int_{y_1}^{y_2} \gamma dy = \gamma_0 \frac{273}{b} \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} = \gamma_0 \frac{273}{b} \ln \frac{T_2}{T_1}. \quad (20)$$

Если на рассматриваемом участке температура изменяется от T_1 до T_2 , то

$$T_1 = a + by_1 \quad (21)$$

и

$$T_2 = a + by_2, \quad (22)$$

откуда

$$b = \frac{T_2 - T_1}{y_2 - y_1}. \quad (23)$$

Таким образом:

$$\int_{y_1}^{y_2} \gamma dy = \gamma_0 \frac{273}{T_2 - T_1} (y_2 - y_1) \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (24)$$

$$p_1 - p_2 = 2 \left(\frac{\omega_2^2}{2g} - \frac{\omega_1^2}{2g} \gamma_1 \right) + \gamma_0 \frac{273}{T_2 - T_1} (y_2 - y_1) \ln \frac{T_2}{T_1}. \quad (25)$$

В общем случае падение абсолютного давления при движении нагреваемого газа по трубопроводу постоянного сечения равно удвоенному приращению скоростного напора плюс изменение энергии положения газа, плюс потери на трение, т. е.

$$p_1 - p_2 = 2 \left(\gamma_2 \frac{\omega_2^2}{2g} - \gamma_1 \frac{\omega_1^2}{2g} \right) + \gamma_0 \frac{273}{b} \ln \frac{T_2}{T_1} + R. \quad (26)$$

Г. П. Иванцов показал, что если температура в канале растет линейно, то величина сопротивления от трения может быть

подсчитана по формуле (43) для γ и T , соответствующих средней температуре газа:

$$T_{cp} = \frac{T_1 + T_2}{2}. \quad (27)$$

Уравнение (26) должно применяться во всех случаях, когда изменение температуры движущегося газа велико: при расчетах регенераторов, рекуператоров и т. д.

Для решения вопросов, связанных с превращением напоров, используется уравнение Бернулли в следующем виде ($\gamma = \text{const}$):

$$\frac{\omega_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + R = \frac{\omega_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + z_1, \quad (28)$$

где: z — высота, соответствующая геометрическому напору, в м;

$\frac{P}{\gamma}$ — высота, соответствующая пьезометрическому напору, в м,

$\frac{\omega^2}{2g}$ — высота, соответствующая скоростному напору, в м.

Формулировка уравнения Бернулли: для материальной частицы идеального газа в выделенной линии тона при установившемся движении сумма геометрического, пьезометрического и скоростного напоров есть величина постоянная. В случае реального несжимаемого газа, в результате потери напора на сопротивление движению, сумма напоров соответственно уменьшается или, другими словами, при установившемся движении реального газа для каждой частицы сохраняется неизменной сумма напоров (H) геометрического, пьезометрического, скоростного и потерян-ного на сопротивление:

$$z + \frac{P}{\gamma} + \frac{\omega^2}{2g} + R = H \text{ м.} \quad (29)$$

Пьезометрический напор, или статическое давление газа, есть разность давлений газа, заключенного в сосуде, и газа окружающей атмосферы. Это давление определяют пьезометром, измерительная трубка которого установлена перпендикулярно к направлению движения газа.

С помощью пьезометров измеряют не абсолютное давление газа, а разность барометрического давления и абсолютного давления в данном сечении. Барометрическое давление является переменной величиной и уменьшается с увеличением высоты.

Если барометрическое давление в исходном нулевом горизонте B_0 , то в горизонте 1 оно равно:

$$B_1 = B_0 - y_1 \gamma_0 \quad (30)$$

и в горизонте 2:

$$B_2 = B_0 - y_2 \gamma_0 \quad (31)$$

или

$$B_2 = B_1 - (y_2 - y_1) \gamma_0, \quad (32)$$

где γ_0 — средний удельный вес воздуха, окружающего канал.

Если разрежение в газоходе для горизонта 1 равно S_1 , а для горизонта 2 — S_2 мм вод. ст., то абсолютные давления в газоходе для горизонтов 1 и 2 будут соответственно равны:

$$p_1 = B_1 - S_1 \quad (33a)$$

$$p_2 = B_2 - S_2 = B_1 - (y_2 - y_1) \gamma_0 - S_2; \quad (33b)$$

и следовательно

$$p_1 - p_2 = S_2 + (y_2 - y_1) \gamma_0 - S_1. \quad (34)$$

Из уравнения (34) следует, что разность абсолютных давлений газа в двух сечениях не равна разности соответствующих разрежений, а отличается на величину $\gamma_0 (y_2 - y_1) = \pm H \gamma_0$. То же относится и к показаниям дифференциальных тигмеров.

Пьезометр показывает давление в измеряемом сечении по отношению к давлению барометра в данном сечении. Если в соединительной трубке пьезометра находится газ с удельным весом, значительно отличающимся от удельного веса воздуха, то пьезометр должен быть расположен только в плоскости пункта замера. Удельный вес газа в трубке может отличаться от удельного веса воздуха вследствие нагрева или в соответствии с составом.

При статическом давлении газа p_{cm} кг/м² и его удельном весе γ_0 кг/м³, статический напор в метрах высоты столба газа равен:

$$H_{cm} = \frac{p_{cm}}{\gamma_0}. \quad (35)$$

Геометрический напор есть напор положения газа относительно некоторого уровня. Геометрическим напором газ располагает в том случае, если удельный вес его отличается от удельного веса окружающего газа, обычно атмосферного воздуха. Если газ легче атмосферного воздуха, он стремится подняться, а если тяжелее воздуха, то опуститься.

Тело тяжелее воздуха обладает потенциальной энергией, равной $(p_1 - p_0)H$, где p_1 — вес тела, p_0 — вес вытесненного им воздуха, H — высота подъема. Легкий нагретый газ (t°) в плоскости точки 1 (см. рис. 4) обладает геометрическим напором (потенциальной энергией), направленным вверх и равным разности веса столба внешнего холодного тяжелого воздуха и веса столба внутреннего легкого нагретого газа, т. е. равным $(\gamma_0 - \gamma_2)H$ кг/м², где: H — глубина опускания газа от некоторого исходного уровня в м, γ_0 и γ_2 — удельный вес соответственно атмосферного воздуха и газа в кг/м³. Если газами являются продукты горения, то обычно можно принять, что при 0° $\gamma_{00} = \gamma_{20} = 1,29$ кг/м³, и следовательно;

$$P_{geom} = H (\gamma_{0,0} - \gamma_{2,t}) = H \left(\gamma_{0,0} - \gamma_{0,0} \frac{273}{T} \right);$$

$$P_{geom} = H \gamma_{0,0} \frac{t}{T} = 1,29 H \frac{t}{T} \text{ кг/м}^2, \text{ или мм вод. ст.}, \quad (36)$$

где T — абсолютная температура в $^\circ K$.

$$H_{geom} = \frac{P_{geom}}{\gamma_t} \text{ м (в м столба газа с объемным весом } \gamma_t). \quad (37)$$

Под динамическим или скоростным напором понимается величина

$$H_0 = \frac{\omega^2}{2g} \text{ в м столба движущегося газа}$$

или

$$P_0 = \frac{\omega^2}{2g} \gamma_t \text{ кг/м}^2, \text{ или мм вод. ст.}$$

где: ω — действительная скорость газа в м/сек.;

g — ускорение силы тяжести в м/сек²;

γ_t — действительный удельный вес газа в кг/м³.

Если одно колено манометра соединить с установленной в газопроводе трубкой, отверстие которой расположено перпендикулярно к направлению движения потока, а другое колено — с трубкой, отверстие которой расположено параллельно направлению движения потока, то манометр покажет динамический напор газа, так как первая трубка измеряет сумму статического и динамического напоров, а вторая — статический напор. Давление, вызываемое столбом $H_0 = \frac{\omega^2}{2g}$ м нагретого газа, равно давлению:

$$P_0 = \frac{\omega_0^2}{2g} \gamma_t = \frac{\omega_0^2}{2g} \gamma_0 \frac{T}{t} \text{ мм вод. ст.}, \quad (38)$$

где: ω_0 — условная скорость газа при 0° в м/сек.;

γ_0 — удельный вес газа при 0° и 760 мм рт. ст.

3. ПРЕВРАЩЕНИЯ НАПОРОВ

При движении газов происходят превращения напоров. Связь между напорами выражается уравнением Бернулли.

Превращения напоров легко проследить на примере.

Если удельный вес внешнего воздуха γ_0 кг/м³ и газа в сосуде (см. рис. 4) — γ_2 кг/м³, то напор газа в точке 1 равен геометрическому напору $H (\gamma_0 - \gamma_2)$ кг/м².

В точке 2 геометрический напор равен нулю, но в этом положении газ обладает (если пренебречь сопротивлениями при подъеме газа) пьезометрическим напором, равным $H (\gamma_0 - \gamma_2)$ кг/м², указываемым манометром. В точке 3, если пренебречь сопротивлениями движению, газ обладает динамическим напором, равным $\frac{\omega^2}{2g}$ м столба движущегося газа, или равным также:

$$H (\gamma_0 - \gamma_2) = \frac{\omega^2}{2g} \gamma_0 \text{ кг/м}^2. \quad (39)$$

Статический напор газа в точке 3 равен нулю. В точке 4 за трубкой и статический, и динамический, и геометрический напоры равны нулю, но имеется напор, затраченный на удар о неподвижный атмосферный воздух при вытекании газа из тонкой трубки. Во всех положениях материальной точки сумма напоров геометрического, пьезометрического, динамического и потеряннного на сопротивление равна постоянной величине. В данном случае эта величина равна:

$$h = H(\gamma_0 - \gamma_c) \text{ кг/м}^2.$$

Если печное пространство соединяется с окружающим воздухом, то газ движется в направлении, в котором общий напор (сумма четырех напоров) окажется равным напору окружающей атмосферы.

4. ХАРАКТЕР ДВИЖЕНИЯ ГАЗОВ

Движение газов может быть ламинарным и турбулентное.

Различие между ламинарным и турбулентным потоками заключается в том, что в ламинарном потоке движение лишь отдельных молекул имеет хаотически пульсирующий характер, а в турбулентном потоке подобной пульсации подвержены крупные частицы жидкости или газа, состоящие из большого количества молекул. Характер движения жидкости в трубопроводе обусловлен некоторым безразмерным и зависящим от совокупности факторов критерием Рейнольдса, который характеризует отношение сил инерции к силам вязкости:

$$Re = \frac{wd\gamma}{g\mu}, \quad (40)$$

где: w — скорость газа в м/сек;
 d — диаметр трубопровода в м;
 γ — удельный вес газа в кг/м³;
 g — ускорение силы тяжести (9,81 м/сек²);
 μ — коэффициент вязкости в кг сек/м².

При $Re < 2320$ движение ламинарное, при $Re > 2320$ — турбулентное.

В действительности характер потока меняется не сразу; при скоростях, близких к критической, характер потока неустойчив и может быть промежуточным между ламинарным и турбулентным. Условие $Re = 2320$ дает нижний предел критической скорости. Ламинарный характер движения может сохраниться также при скоростях, выше определяемых условием $Re = 2320$, при спокойном поступлении газов в газопровод, отсутствии толчков, способствующих возмущению потока, и при соответствующем состоянии стенок. Ряд обстоятельств (острые края входного отверстия трубопровода, прохождение газа через регенеративную насадку, наличие задвижек) может вызвать завихрение ламинарного потока и облегчить его переход в турбулентный.

Скорость в отдельных точках сечения прямолинейного газопровода неодинакова и зависит от их положения по отношению к оси газопровода. При ламинарном движении скорость изменяется по параболическому закону. При этом скорость по оси максимальна (w_{max}), у стенок — равна нулю, а средняя скорость в сечении

$$w_{cp} = \frac{1}{2} w_{max}.$$

С увеличением числа Рейнольдса движение становится турбулентным. При турбулентном движении поток делится на две резко отличные области: внутреннее ядро и внешнюю оболочку — пограничный слой. Для точек, лежащих в области внутреннего ядра, различие в скоростях мало. В пограничном слое движение ламинарное, градиент падения скорости возрастает; у стен скорость равна нулю, т. е. слой прилипает к ним.

Средняя скорость при турбулентном движении больше $1/2 w_{max}$. Таким образом, при $Re > 2320$ характер потока во всем сечении одинаков, но у стен находится тонкий пограничный слой.

Пограничный слой препятствует теплоотдаче. С увеличением скорости движения газов можно уменьшить толщину пограничного слоя, а следовательно, улучшить теплоотдачу.

В печной практике ламинарный характер потока редко имеет место.

5. СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ ГАЗОВ

При движении газов возникают потери напора, связанные с переходом кинетической энергии в тепловую в результате трения частиц газа о стенки и ударов потоков о поперечные препятствия и друг о друга.

Потери напора на участках пути газа, обусловленные изменением скорости и направления движения газов, называют местными сопротивлениями в отличие от сопротивлений от трения, имеющего место по всему пути газопровода, главным образом вследствие трения газа о его стенки.

Полное сопротивление системы A_c складывается из сопротивлений местных (h_m), от трения (h_{mP}) и связанных с преодолением геометрического напора (h_g):

$$A_c = h_m + h_{mP} \pm h_g \text{ кг/м}^2. \quad (41)$$

Под внешним сопротивлением понимают затрату тяги на систему или разность наблюдаемых разрежений в начале и конце ее. Эта затрата тяги на систему равна полному гидравлическому сопротивлению, т. е. сопротивлениям местным и от трения, за вычетом ее самотяги.

Если разрежения, измеренные в двух различных сечениях, равны S_2 и S_1 кг/м² и разность их нивелирных высот $y_2 - y_1$ м, то гидравлическое сопротивление системы B_c :

$$B_c = S_2 - S_1 + (y_2 - y_1)(\gamma_2 - \gamma_1) \text{ кг/м}^2. \quad (42a)$$

Если имеется несколько подъемов и опусканий каналов, то:

$$B_c = S_m - S_x + \sum_c H (\gamma_g - \gamma_a) \text{ кг/м}^2, \quad (42б)$$

где: $\sum_c H (\gamma_g - \gamma_a)$ — алгебраическая сумма произведений $H (\gamma_g - \gamma_a)$, H — соответствующие высоты отдельных каналов, γ — соответствующие каждому каналу средние удельные веса газа.

Подъемы берутся со знаком плюс и опуски — со знаком минус. Величина $\sum_c H (\gamma_g - \gamma_a) = h_a$ называется самотягой системы.

Система, состоящая из последовательных подъемных и опускных каналов, в которых протекает охлаждающийся и нагревающийся газовый поток, может обладать большой самотягой и являться тяговым аппаратом.

Сопротивление от трения

Сопротивление от трения в значительной степени зависит от характера движения.

При ламинарном движении неровности стенок находятся в области неподвижного слоя газов или плавно обтекаются, поэтому струи не срываются с острых выступов стенок и шероховатость стен не влияет на сопротивление потока.

Сопротивление пограничного слоя при турбулентном характере потока значительно. На величину сопротивления влияет также шероховатость стен, особенно, если размеры выступа превышают толщину пограничного слоя.

При турбулентном движении струи, срывающиеся с выступов стен, образуют вихревые кольца. При попадании сорвавшегося кольца из области малых скоростей в область больших скоростей «ядра сечения» скорость его увеличивается до скорости ядра сечения, что вызывает большую затрату энергии на преодоление сопротивлений при движении потока.

При движении по каналам газов, обладающих малыми манометрическими напорами, можно пренебречь расширением газа. В этом случае вычисляют потери напора по формуле:

$$h_{mp} = \xi \frac{w^2 L \gamma}{2gd} = \xi \frac{w_0^2 L \gamma_0 T}{2gd t}, \quad (43)$$

где: h_{mp} — сопротивление от трения, в мм вод. ст.;

ξ — коэффициент сопротивления от трения;

w и w_0 — скорость газа, действительная и приведенная к нормальным условиям, в м/сек.;

γ и γ_0 — удельный вес газа, действительный и приведенный к нормальным условиям, в кг/м³;

L — длина канала, в м;

d — диаметр канала при круглом сечении или приведенный диаметр $\left(\frac{4w}{\pi}\right)$ при некруглом, в м;

S — периметр канала, в м;

ω — поперечное сечение канала, в м².

Для условий ламинарного движения:

$$\xi = \frac{a}{\text{Re}}. \quad (44)$$

Опыт дает, что $a = 64$, откуда:

$$h_{mp} = 32\mu w \frac{L}{d^2} \text{ кг/м}^2, \quad (45)$$

т. е. потеря напора от трения при ламинарном движении пропорциональна первой степени скорости, вязкости газа и длине канала и обратно пропорциональна квадрату диаметра канала. Сопротивление движению в области ламинарного потока возрастает по прямой; с переходом к турбулентному движению сопротивление возрастает скачком и далее растет быстрее скорости.

В области турбулентного движения величина ξ зависит от шероховатости труб и числа Рейнольдса.

Для гладких труб:

$$\xi = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}}. \quad (46)$$

Для шероховатых металлических труб в переходной области:

$$\frac{1}{\sqrt{\xi_{ш}}} - 2 \lg \frac{d}{K_0} = f \left[\lg \left(\frac{\text{Re} K_0}{d} \sqrt{\frac{\xi_{ш}}{8}} \right) \right] \quad (47)$$

Значение функции берется по данным Всесоюзного теплотехнического института (ВТИ) (рис. 5) и в области больших чисел Re:

$$\xi_{ш} = \frac{1}{(1,14 + 2 \lg \frac{d}{K_0})^2}, \quad (48)$$

где K_0 — эквивалентный линейный размер неровности (для новых стальных труб $K_0 = 0,06 \cdot 10^{-3}$ м, для старых — $0,2 \cdot 10^{-3}$ м и для сильно разведенных — $1 \cdot 10^{-3}$ м).

По Доброхотову, для кирпичных каналов можно принять:

$$\xi_{кир} = \frac{0,175}{\text{Re}^{0,12}}. \quad (49)$$

После подстановки значений ξ в формулу (43) получаем, что потеря напора от трения при турбулентном движении пропорциональна скорости в степени 1,75—2.

Для упрощения расчетов величину ξ можно грубо принимать равной для кирпичных каналов 0,05 металлических слабоокисленных—0,035—0,04, чистых—0,025, бывших долго в употреблении и покрытых коркой—0,045.

Если температура жидкости при течении изменяется (неизотермическое движение), движение газов становится неравновесным вследствие изменения плотности и скорости газов. Это определяет некоторую неточность формул и коэффициентов, используемых при расчетах нечех.

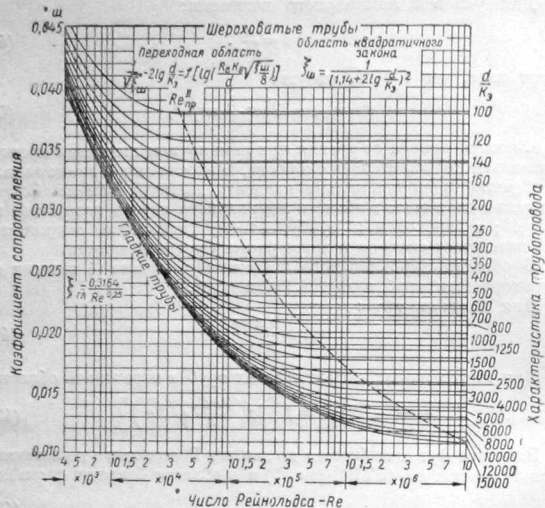


Рис. 5. Зависимость коэффициента сопротивления от трения от характера движения и шероховатости стен (кривая $\text{Re}_{\text{пр}}$ ограничивает область квадратичного закона).

Местные сопротивления

При изменении направления или скорости потока имеют место необратимые потери. При уменьшении скорости движения быстро движущиеся частицы ударяются о медленно движущиеся. При внезапном изменении направления возникает лобовой удар о препятствие.

Мертвые пространства, образующиеся при изменении скорости и направления, также являются источниками потерь ввиду развития в них вихрей и сужения струи при повороте.

В газопроводах, обслуживающих печи, наибольшими являются местные сопротивления. Поэтому соединительным и фасонным частям следует придавать форму, обеспечивающую малую величину сопротивления. В ответвлениях желательно принимать те же скорости, что и в главном газопроводе, во избежание потерь от ударов. Ответвлению может быть придана расширяющаяся форма для перехода к меньшей скорости. Применяя диффузор, можно использовать 80% освобождающегося напора.

Коэффициенты местных сопротивлений

Вид сопротивления	Значение ζ	Примечания
Внезапное расширение	$\left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2$	
Постепенное расширение	$\left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 \sin^2 \alpha$	α — двусторонний угол расширения
Внезапное сужение	$\frac{\omega_2}{\omega_1} \zeta$	Отнесен к ω_2
Вход в отверстие с закругленными кромками	0,1 — 0,50 0,3 — 0,42 0,6 — 0,26 1,0 — 0,0	
Резкий поворот на 90°	1,5 — 2	Большая величина — для прямоугольных каналов; меньшая — для круглых или квадратных
Резкий поворот на 45°	0,5	
Плавный поворот на 90°	$\frac{r}{d} \zeta$	r — радиус закругления; d — диаметр канала; для гладких каналов на 40 – 50% меньше
Разветвление под углом 90°	1	
Слияние под углом 90°	1	
Слияние под углом 180°	1,5	
Плавное разветвление под углом 180°	3	
Плавное слияние под углом в 180°	2	

Примечания: 1. ω_1 и ω_2 означают соответственно площадь сечения и скорость газа; индекс 1 относится к входному сечению и 2 — к выходному.
2. Коэффициенты сопротивлений отнесены к скоростному напору у входа, за исключением оговоренных в примечаниях случаев.
3. При поворотах, разветвлении и слиянии принято $\omega_1 = \omega_2$.

При значительных скоростях следует избегать резких изменений сечения и поворотов.

Необратимые потери, вызванные изменением направления или скорости потока, учитывают соответствующим коэффициентом сопротивления при величине скоростного напора, т. е.

$$h_{\text{м}} = \zeta \frac{w^2}{2g} \gamma, \quad (50)$$

где: $h_{\text{м}}$ — потеря напора в мм вод. ст.;
 ζ — коэффициент местного сопротивления, в большинстве случаев определяемый опытом,

Иногда местные сопротивления учитывают приведенной длиной трубопровода L_{np} , представляющей собой такую условную длину прямого его участка, для которой потеря от трения равна местному сопротивлению.

Связь между L_{np} и ζ устанавливается из равенства:

$$\zeta \frac{v^3}{2g} \gamma = \frac{\xi L_{np} v^3}{2gd} \gamma, \quad (51)$$

откуда

$$L_{np} = \frac{\xi d}{\zeta}. \quad (52)$$

Значения коэффициентов местных сопротивлений приведены в табл. 2.

6. СОПРОТИВЛЕНИЕ ЗАПОЛНЕНИЙ

Сопротивление заполнений из сыпучих и зернистых материалов определяется по формуле Всеосюзного теплотехнического института (ВТИ):

$$h = \xi \frac{H v^2 \gamma}{2gd_{эке}}, \quad (53)$$

где: ξ — коэффициент, зависящий от величин f , $d_{эдр}$, характера движения и др. факторов;

f — коэффициент порозности слоя;

H — высота слоя в м;

γ — удельный вес газа в кг/м³;

w — скорость газа, отнесенная к полному сечению оболочки в м/сек.;

$d_{эдр}$ — гидравлический диаметр куска.

$$f = \frac{V_{пуст}}{V_{слой}} = \frac{\gamma_{мат} - \gamma_{насыпн}}{\gamma_{мат}}; \quad (54)$$

$$d_{эдр} = \frac{2}{3} d_{эке} \frac{f}{1-f}, \quad (55)$$

где: $V_{пуст}$ — объем пустот в слое в м³;

$V_{слой}$ — объем всего слоя в м³;

$\gamma_{мат}$ — удельный вес материала в кг/м³;

$\gamma_{насыпн}$ — объемный вес насыпи в кг/м³;

$d_{эке}$ — условный размер куска (средневзвешенный) в м.

$$d_{эке} = \sum g_n b_n, \quad (56)$$

где: g_n — весовая доля фракции рассева;

b_n — размер фракции, соответствующий среднему расчетному размеру отверстий сит при просеве в м.

Для шаров в ламинарной области ($Re < 7$) при $f = 0,4$:

$$\xi = \frac{2056}{Re}, \quad (57)$$

а в промежуточной и турбулентной области ($Re > 7$) при $f = 0,4$:

$$\xi = \frac{1800}{Re} + \frac{46}{Re^{0,08}}. \quad (58)$$

При данном Re величина ξ не зависит от размера зерна в случае, если частицы материала сохраняют при изменении постоянной форму и степень шероховатости, влияющие на величину порозности. Поэтому для каждого материала может быть своя зависимость величины ξ от Re . В случае недостаточности экспериментальных данных для естественных материалов пользуются данными, имеющимися для шаров.

Для смесей с постепенным и равномерным переходом от одного размера к другому свободный объем равен среднему для заполнений из отдельных фракций. При резком изменении размера свободный объем меньше, так как мелкие частицы располагаются в промежутках между крупными, и коэффициент ξ следует умножить на характерный для данного материала фактор, который может быть получен из одного опыта при любой скорости, температуре и размере кусков. Значение поправочного фактора колеблется в пределах 0,6—4,0, но чаще всего равняется 1,5.

7. ИСТЕЧЕНИЕ ГАЗА ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ, НАСАДКИ И СОПЛА

Расход газа, вытекающего из сосудов, зависит от давления в сосудах, формы и размера отверстий и насадков. При давлениях ниже 1000 мм вод. ст. изменением объема газа в зависимости от давления можно пренебречь.

Ниже рассмотрено истечение газа под низким давлением.

Если газ истекает через отверстие в стенке сосуда больших размеров, можно пренебречь скоростным напором его в сосуде. Скорость вычисляется из выражения:

$$w_1 = \varphi \sqrt{\frac{2gk}{\gamma}} \text{ м/сек.}, \quad (59)$$

где φ — коэффициент сжатия струи, равный 0,62.

Если газ истекает через цилиндрическую трубу, приставленную к тонкой стенке (насадок), то при достаточной ее длине ($l > 4d$) газ вытекает из отверстия полным сечением. Опытом установлено, что коэффициент расхода φ равен при этом 0,82, т. е. он в $\frac{0,82}{0,62} = 1,32$ раза больше, чем для отверстия в тонкой стенке.

Если закруглить край отверстия, потерь напора при сжатии струи не будет и скорость и расход газа будут еще больше.

Расширение насадок уменьшает потери и увеличивает расход газа. Однако при увеличении угла раскрытия более 7—10°, потери возрастают вследствие отрыва струи от стен. Увеличение длины обуславливает возрастание сопротивления от трения.

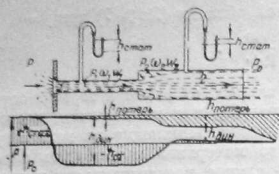


Рис. 6. Схема движения газа и распределение давлений (с учетом потерь от трения).

Если пренебречь потерями от трения, то пьезометрический напор в широком канале равен внешнему (p_0). Пьезометрический напор в точке I может быть определен из равенства напоров в сечениях I и 2 , т. е.:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{w_1^2}{2g} = \frac{p_0}{\gamma} + \frac{w_2^2}{2g} + \frac{(w_1 - w_2)^2}{2g},$$

откуда

$$p_1 - p_0 = \frac{w_2(w_2 - w_1)}{g} \gamma \text{ мм вод. ст.} \quad (62)$$

Так как $w_1 > w_2$, пьезометрический напор в узком канале отрицательный, т. е. меньше атмосферного. Изменение напоров видно из диаграммы напоров (рис. 6). Скорость движения газа в сосуде с давлением p принята равной нулю.

8. СВОБОДНОЕ И НЕСВОБОДНОЕ ДВИЖЕНИЕ ГАЗОВ

Струя называется свободной и затопленной, если она не ограничена твердыми стенками и распространяется в пространстве, заполненном неподвижной, физически идентичной средой. При этом предполагается, что сама струя физически однородна и при вытекании представляет собой обычный турбулентный поток. Струя, вытекающая в пространство сравнительно небольших размеров, несвободна. Часто струя образуется отдельными потоками, не полностью смешанными до поступления в рабочее пространство или даже смешивающимися только в рабочем пространстве. В этом случае говорят о вынужденных потоках.

При вытекании струи (рис. 7) из сопла в свободное пространство скорость ее уменьшается. Струя турбулентна и ее течение сопровождается перемешиванием движущихся вихревых масс на поверхности струи со слоями неподвижной среды и вовлечением в струю частиц газа из окружающей среды. Подторможенные частицы активного потока вместе с увлеченными частицами окружающей среды образуют турбулентный пограничный вихревой слой, толщина которого возрастает в направлении течения. Примешанные

Рассмотрим движение газов по рис. 6.

Потери при выходе:

$$h_1 = \frac{w_2^2}{2g} \text{ м столба газа.} \quad (60)$$

Потери при переходе из узкого канала в широкий:

$$h_2 = \frac{(w_1 - w_2)^2}{2g} \text{ м столба газа.} \quad (61)$$

Если пренебречь потерями от трения, то пьезометрический

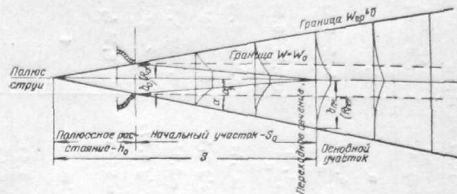


Рис. 7. Схема свободной струи:

b_0 — половина высоты плоской струи; R_0 — радиус круглой струи.

частицы внешней среды замедляют движение активной среды, увлекая в то же время ее массу.

В струе различают начальный и основной участки. Пограничный слой, отделяющий струю от неподвижной среды, ограничен расходящимися у кромок сопла поверхностями.

В начальном участке струя имеет ядро постоянных скоростей, равных начальной. За начальным находится основной участок, в котором не только увеличивается размер потока, но и уменьшается скорость на оси потока.

Давление в струе неизменно и равно давлению в окружающей среде. Полное количество движения секундной массы свободной струи во всех сечениях одинаково.

Форма круглой струи не изменяется. Струя прямоугольной или сложной формы превращается на известном расстоянии от сопла в круглую.

Законы движения свободной струи изучены Абрамовичем, установившим соотношение размеров и скоростей струи. По его данным для круглой струи основной участок начинается на расстоянии $4,5-5D$ (диаметров сопла) и скорость на оси струи w_1 в области основного участка и другие данные определяются из равенств, приведенных в табл. 3.

Распределение скоростей в струе на расстоянии, большем $5D$ от сопла, может быть определено по правилу треугольника.

Тимофеев и Сычев показали, что выведенные выше соотношения характерны для холодной или слаборазогретой струи и что они являются частным случаем более общей, установленной ими, закономерности. Исследование горящего факела, произведенное ими, показало, что для него характерна кривая скоростных напоров $\left(\frac{h^1}{h_0^1}\right)$. Во всех сечениях поля скоростных напоров подобны:

$$\frac{h^1}{h_0^1} = \left(0,30 + 0,14 \frac{S_0 + x}{2R_0}\right)^2 \quad (63)$$

Основные данные для расчета свободной одиночной струи

Показатели	Круглая струя				Плоская струя	
	расчетная формула	сужив. сошло	цилиндр. сошло	расшир. сошло	расчетная формула	средние значения
Коэффициент структуры струи	a	0,066	0,072	0,080	a	0,09—0,42
Глубина полуса	$\frac{h_0}{R_0} = \frac{0,29}{a}$	4,40	4,03	3,63	$\frac{h_0}{b_0} = \frac{0,41}{a}$	4,55—3,42
Длина начального участка	$\frac{S_0}{R_0} = \frac{0,67}{a}$	10,45	9,30	8,37	$\frac{S_0}{b_0} = \frac{1,03}{a}$	11,45—8,58
Тангенс бокового угла расширения	$\operatorname{tg} \alpha = 3,4a$	0,225	0,245	0,272	$\operatorname{tg} \alpha = 2,4a$	0,245—0,238
Боковой угол расширения струи	$\alpha = \operatorname{arc} \operatorname{tg} 3,4a$	42°40'	43°45'	45°15'	$\alpha = \operatorname{arc} \operatorname{tg} 2,4a$	2°10'—46°05'
Тангенс угла сужения грани ядра	$\operatorname{tg} \alpha' = 1,5a$	0,099	0,108	0,120	$\operatorname{tg} \alpha' = 0,97a$	0,088—0,116
Боковой угол сужения грани ядра	$\alpha' = \operatorname{arc} \operatorname{tg} 1,5a$	5°40'	6°10'	6°50'	$\alpha' = \operatorname{arc} \operatorname{tg} 0,97a$	5°00'—6°35'
Величина переходного сечения	$R_{sp} = S \operatorname{tg} \alpha$	3,25 R_0	3,26 R_0	3,26 R_0	$b = S \operatorname{tg} \alpha$	3,46 b_0
Осевая скорость в пределах начального участка	$\frac{w_1}{w_0} = f = \operatorname{const}$	1	1	1	$\frac{w_1}{w_0} = f = \operatorname{const}$	1
Осевая скорость на основном участке	$\frac{w_1}{w_0} = \frac{0,096}{R_0} \sqrt{\frac{a S_0^2 + x}{1 + 0,29}}$	—	—	—	$\frac{w_1}{w_0} = \frac{1,20}{b_0} \sqrt{\frac{a S_0^2 + x}{1 + 0,41}}$	—

Если размеры горелок малы сравнительно с размерами планетного пространства, вытекающая струя по своим свойствам приближается к свободной. Так как газы не могут поступить извне, давление по длине расширяющейся струи растет; поэтому периферийные слои струи, имеющие малую скорость, отделяются и движутся в обратном направлении.

Полученные данные позволяют рассчитать скорость и расход газов, а следовательно позволяют определить дальность струи, под которой понимается ее способность сохранять значительную скорость на расстоянии от сопла. Дальностью возрастает с увеличением начальной скорости газов и диаметра сопла.

Возникающие при горении силы перераспределяют количества движения без изменения их суммарного значения, и горение в свободной струе не нарушает закона постоянства количества движения.

При ударе свободной струи о стенку, перпендикулярную ее оси, частицы газа отгибают стенку по кривой, близкой к дуге круга. При движении частицы возникает центробежная сила, оказывающая давление на частицы, расположенные между рассматриваемой частицей и стенкой. Слагающие центробежных сил элементы струй, направленные по оси струи, передаются на стенку и создают давление p , испытываемое стенкой. Это давление свободной струи на стенку, ей перпендикулярную, равно количеству движения свободной струи. Удельное давление равно количеству движения струи, деленному на площадь стенки.

Реакции горения, протекающие в струе, не вызывают изменения количества движения, а следовательно, и изменения давления на стенку.

Если струя газа после огибания стенки встречает перпендикулярно расположенную стенку и поворачивается на 180°, количество движения отбрасываемой струи равно начальному, но с обратным знаком, и реакция стенки равна удвоенному количеству движения струи. Сближение продольных стенок печи вызывает взаимное торможение встречающихся потоков, уменьшающее реакцию торцевой стенки.

При неизотермическом истечении струи, вследствие разности плотностей струи и окружающей среды, ее ось искривляется в вертикальной плоскости.

9. ДВИЖЕНИЕ ГАЗОВ В ПЕЧНЫХ ПОЛОСТЯХ

Естественное и принудительное движение газов

Движение газов может быть естественным и принудительным. Движение газов под влиянием сил, возникающих вследствие разности удельных весов газов в различных точках рабочего пространства печи, называют естественным (свободным, естественной конвекцией). Оно происходит без какого-либо побуждения извне. Газы нагреваются, соприкасаясь с более горячей стенкой и охла-

ждаться, соприкасаясь с более холодной стенкой. Изменение температуры обуславливает возникновение геометрического напора и в результате естественное движение газов. Это движение является причиной естественной или свободной циркуляции газов.

Принудительное (вынужденное) движение возникает под действием сил, приложенных извне. Этими силами могут быть, например, кинетическая энергия струи, выходящих из горелок или форсунок, разность давлений в начале и конце печного объема или газохода. Принудительное движение может также осуществляться за счет потери напора в самой рабочей камере. В этом случае путь газов определяется сопротивлениями прохождению и влиянием начальной скорости.

Чисто естественное или чисто принудительное движение газов в печах редко имеет место. В большинстве случаев движение газов вызывается действием совокупности сил, возникающих в самой газовой среде, и внешних.

Обычно газы подают в рабочую камеру печи из топочных устройств или форсунок и горелок. Рабочая камера печи имеет размеры, значительно превосходящие размеры выходных отверстий форсунок и горелок. Горючая или нагревающая струя газов, выходящая из горелок, образует мощный циркуляционный поток в рабочей камере. На это затрачивается кинетическая энергия газа, т. е. эта струя в силу внутреннего трения увлекает и приводит в движение газы, находящиеся в рабочей камере.

Количество увлекаемых газов может в 5—10 и больше раз превышать количество входящей смеси. Поток, ударяясь о стенку печи, расходится во все стороны. Частично он отводится в дымовые каналы и частично примешивается к струе поступающих газов. Вокруг струи образуется рециркуляционный поток, движущийся в сторону, противоположную движению газов.

Температура рециркуляционного потока — промежуточная между температурой струи и окружающих газов. При прохождении у твердой поверхности пламенные газы движутся вдоль нее, и рециркуляционный слой отсутствует.

Теория естественного движения газов в печах и правила конструирования печей, в которых оно преобладает, составляет основное содержание гидравлической теории В. Е. Грум-Гржимайло. Эта теория дает объяснение работы и правила построения печей с невысокой производительностью.

В. Е. Грум-Гржимайло сопоставил движение печных легких газов в атмосфере тяжелых и движение тяжелой жидкости в легкой. Он первый изучал движение газов в моделях печей и применил механику газов к расчетам печей.

Одним из видов естественного движения газов является движение газосливом (обращенным водосливом). Сливается горячий газ за счет выдавливания его холодным газом, окружающим газослив.

В. Е. Грум-Гржимайло предположил, что печные газы, ограниченные сводом и стенами печи или канала, движутся по дну, изоцированным от подстилающих газов. Отсюда был сделан вывод, что высота потока, сливающегося газосливом, должна определять высоту окна в конце рабочей камеры печи для того, чтобы на полу не было холодных газов, а также высоту каналов для того, чтобы они не имели чрезмерно больших размеров. Соответствующие формулы для определения высоты газослива были выведены И. Г. Есьманом. В настоящее время этими формулами пользуются редко в виду того, что обычно в печах отсутствуют условия, соответствующие указанным допущениям.

Гидравлическая теория также устанавливает правила деления в вертикальном направлении потоков нагревающихся и охлаждающихся газов. Эти правила используют в печах, работающих с естественной тягой (см. ниже).

В связи с переходом в современных печах к принудительным подаче и отводу газов, работе с большими скоростями и интенсификации, гидравлическую теорию, сыгравшую положительную роль, в настоящее время используют в отдельных частях. Современная теория движения газов базируется на положениях теплопередачи и механики газов. Вследствие сложности применяемых печей большое распространение получило изучение их методом моделей.

Движущая сила

Температуры в печных полостях высокие, и удельный вес печных газов значительно ниже удельного веса воздуха. Если температура внешнего воздуха 20° , газ в рабочей камере 1500° и в воздухоподогревателе в среднем 800° , то удельный вес внешнего воздуха — 1,21, газ в подогревателе — 0,33 (в 3,7 раза меньше) и в рабочей камере — 0,20 кг/м³ (в 6 раз меньше). Соответственно этому в печных полостях развивается значительный геометрический (естественный) напор (рис. 87).

В новейших печах стремятся интенсифицировать технологические процессы и применять приспособления для использования тепла отходящих газов небольших размеров. Это требует увеличения скорости газов. В результате возрастают сопротивления на пути газов и возникает необходимость в специальных приспособлениях для транспорта газа, которые искусственно создают напор.

В случае недостатка напора, в печь поступает меньшее количество воздуха и газа, вследствие чего мощность ее падает, т. е. уменьшается количество оставляемого в ней тепла, и возможно падение температур в печи, даже при пониженной нагрузке.

При естественном дутье воздуха и подаче газа под давлением можно принимать значительно меньшие сечения клапанов и каналов, чем при подаче воздуха и газа за счет естественного напора.

В каналах напор экономат для того, чтобы использовать его на тех участках, где повышение скорости газов вызывает улучшение теплоотдачи. Скорость газов в регенераторах и рекуператорах должна обеспечить турбулентность потока и достаточно хороший теплообмен. Скорость газов в горелках должна быть такова, чтобы газы смешивались надлежащим образом и выходили в печь со скоростью, достаточной для снятия с поверхности материалов остывшего вязкого слоя газов, который препятствует передаче тепла излучением и конвекцией. Слой остывших газов уменьшает количество тепловых лучей, падающих непосредственно от факела на поверхность материала, и, кроме того, поглощает часть проходящей через него лучистой энергии.

Увеличение с возрастанием скорости газов количества тепла, передаваемого конвекцией, имеет большое значение лишь в области низких температур.

В области высоких температур (в рабочей камере печи) влияние остывшего, вязкого и малоподвижного слоя газов заключается, главным образом, в уменьшении количества тепла, передаваемого материалу излучением.

Для улучшения теплоотдачи, если не препятствует технология процесса, газы, подаваемые в печь из горелок, следует направлять на поверхность материала со значительной скоростью.

При опасности перегрева материала и необходимости равномерного его нагревания поступающая в рабочем пространстве струя газов не подается непосредственно на поверхность материала, а предварительно перемешивается с более холодными газами в результате циркуляции.

Чтобы создать циркуляцию при естественном движении, газы иногда подогревают. Нагретые газы поднимаются, отдавая свое тепло, после чего часть их отводится наружу, а остальные опускаются и в смеси со свежими газами вновь подогреваются (многократная циркуляция).

Распределение температур в рабочей камере печи более равномерно при отводе газов у основания камеры, чем при отводе в верхних частях, например, у свода. При отведении газов через отверстие в своде из печи удаляются неиспользованными наиболее горячие газы. Вследствие этого нижняя часть рабочей камеры может оказаться не заполненной пламенем. Уменьшение выходного отверстия вызывает увеличение заполнения пламенем рабочей камеры, но не может препятствовать удалению из печи наиболее горячих газов. По этим причинам в печах с отводом газов вверх (с восходящим пламенем) нельзя достичь равномерного распределения температур в рабочей камере и отвода наиболее остывших газов.

Отбор отходящих газов у пода (в печах с так называемым обращенным движением газов) в большей мере обеспечивает

равномерное распределение температур в печи и отвод уже охладившихся газов. Эти печи имеют большое распространение в тех случаях, когда по технологии процесса не нужно создавать у пода мешка холодных газов.

В печах с обращенным движением газов последние можно подводить в рабочую камеру на различном уровне.

В случае подвода нагревающих газов вверх рабочей камеры печи и движения газов сверху вниз, температура опускающихся газов понижается вследствие отдачи тепла, и равномерный нагрев материалов по вертикали затруднителен. Подвод газов на уровне пода (рис. 92) позволяет в значительной мере выравнять температуры по высоте вследствие излучения поступающих газов и некоторого присасывания ими отходящих газов (естественная циркуляция).

При конструировании печей следует избегать возможности движения газов по короткому пути. При движении газов с небольшой скоростью это достигается соответственным отдалением подводящих и отводящих газы отверстий или же установлением определенного режима давлений.

Из горелок в печь поступает расширяющаяся струя, состоящая из топлива, воздуха и продуктов горения.

При турбулентном движении часть кинетической энергии струй теряется непосредственно на внутреннее трение как и при ламинарном, а часть предварительно преобразуется в энергию вихрей, принимаемую по мере их затухания. Явление осложняется процессом горения, которое сопровождается изменением температуры, объема и удельного веса газов.

При подлежащих направлении и скорости газы движутся вдоль поверхности материала вплоть до отводящего хода. В результате удара о поверхность стенки, в которой находится отводящее отверстие, повышается давление. Если температура стенок выше температуры нагреваемого материала, происходит некоторая циркуляция газов у стен.

Струя, распространяющаяся вдоль поверхности жидкого или твердого тела, называется настильной. Она имеет большую дальность вследствие уменьшения потерь на вовлечение в поток частиц окружающей среды.

Применительно к пламенному пространству печей формулы, основанные на законах движения свободной струи, требуют экспериментальной проверки. Они характеризуют изменение концентрации и температур под влиянием диффузии, теплопроводности и скорости потока. Эти процессы менее интенсивны, чем выделение тепла и продуктов горения, т. е. формулы характеризуют явления до начала горения или после его окончания. Изменения возникают и вследствие наличия ограждающих поверхностей.

Во многих случаях в пламенное пространство газообразное горючее и воздух для горения подают отдельными струями.

В этих случаях решающее значение для характеристики процесса горения и движения газов имеет смещение и взаимодействие активных потоков, а также влияние стен, ограничивающих пространство, в которое вытекает струя.

В туннельной печи (гл. XV) газы движутся в горизонтальном направлении и при этом изменяется их температура, а следовательно, и удельный вес и геометрический напор. В результате создаются перепады давления по высоте туннеля.

У пода вагонок движение газов в основном определяется перепадом давлений, создаваемым нагнетательными и отсасывающими устройствами печи.

Геометрический напор, создаваемый по высоте туннеля, вызывает под сводом поток газов от зоны обжига к зоне охлаждения, противоположный нижнему потоку у пода вагонок.

В результате неравномерного распределения скоростей потоков резко изменяется температура по высоте туннеля, во избежание чего предусматривают специальные мероприятия: уменьшение свободного сечения сверху туннеля, применение циркулирующих устройств, установку щитов, преграждающих путь газам, и т. д.

Аналогично расслаиваются газы и в кольцевых печах, в которых нижележащие слои нагреваются медленнее и слабее и быстрее охлаждаются. Движению горячих газов у свода в зоне подогрева способствует усадка обжигаемого материала. В зоне охлаждения этот зазор способствует выравниванию температуры. Для выравнивания прогресса в кольцевых печах иногда используют поперечные стенки с отверстиями вниз. Однако они увеличивают сопротивление прохождению газов, уменьшают полезный объем, затрудняют садку изделий в печь и т. д. Иногда применяют щиты, закрывающие верхнюю часть сечения. Это дает хорошие результаты.

В ваньных печах (рис. 87) разность температур по высоте рабочей камеры вызывает движение газовых потоков из отопляемой части в неотапливаемую. Выше и ниже нулевой (нейтральной) линии потоки газов движутся в различных направлениях и необходимо учитывать перенос ими тепла.

Направление разделенного вертикального потока газа

Нижеследующие соображения дают возможность установить правила направления разделенных вертикальных потоков нагреваемых и охлаждающихся газов. Эти правила были установлены С. Б. Лукашевичем и В. Е. Грум-Гржимайло.

Предположим, что по вертикальным каналам (рис. 8) снизу движутся нагревающиеся газы, имеющие более высокую температуру, чем стенки канала, т. е. стенки нагреваются газом. Допустим, что одна из струй стала двигаться быстрее, т. е. что по каналу 1 проходит больше газов, чем по каналу 2. В этом слу-

чае стенки канала 1 начнут охлаждаться интенсивнее, а газ будет нагреваться до более низкой температуры. В результате уменьшения геометрического напора поднимающиеся газы станут двигаться медленнее, т. е. изменение температуры, вызванное неравномерностью, будет стремиться сделать движение во всех каналах равномерным. Если струя в канале 2 будет двигаться медленнее, чем струя в других каналах, стенки канала 2 будут охлаждаться слабее, чем других, подогрев струи и способствующий движению геометрический напор в канале 2 будут усиливаться, пока в должной мере не увеличится скорость газов и не выравняется распределение их по отдельным каналам.

Предположим, что нагревающиеся газы движутся сверху вниз. Допустим, что струя в канале 1 стала двигаться быстрее, чем струи в других каналах. Стенки этого канала будут охлаждаться интенсивнее, газ начнет нагреваться слабее, станет тяжелее, чем в других каналах, и противодействующий движению геометрический напор уменьшится. В результате возникшая неравномерность будет усиливаться и в конце концов газ начнет двигаться преимущественно по отдельным каналам. Температура стен в различных каналах станет неодинаковой.

Таким образом, при движении снизу вверх нагревающиеся газы распределяются равномерно. Отсюда следует, что разделенный вертикальный поток нагреющихся газов следует направлять снизу вверх.

Рассмотрев движение охлаждающихся газов, можно заключить, что разделенный вертикальный поток их следует направлять сверху вниз.

При больших сопротивлениях каналов направление потока не имеет значения, так как система во всех случаях является самовыравнивающейся. Таким образом, направление движения газов не влияет на работу шахтных печей и теплообменных аппаратов, в которых газы движутся со значительными скоростями. В этом случае значительное сопротивление теплообменных аппаратов обычно преодолевают искусственным дутьем.

В аппаратах, работающих за счет естественной тяги, где сопротивления составляют значительную часть геометрического напора (в регенераторах и керамических рекуператорах), следует соблюдать приведенные выше правила деления потоков.

Необходимо отметить, что даже правильное деление потоков, движущихся под действием естественной тяги, недостаточно обеспечивает равномерное распределение газов в различных каналах вследствие влияния инерционных сил движущегося газа.

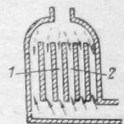


Рис. 8. Движение разделенного газового потока.

10. ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ ТРАНСПОРТА ГАЗА

Газы подводят и отводят за счет создаваемого в печных полостях геометрического напора (естественной тяги) или с помощью приспособлений, искусственно отсасывающих и нагнетающих их.

Поступление газов в печь благодаря естественной тяге связано с наличием в печи нагретых полостей. Если высота нагретой полости H м, удельный вес газов в полости γ_2 кг/м³ и внешнего воздуха γ_0 кг/м³, то у основания полости имеется естественный геометрический напор, равный:

$$H(\gamma_0 - \gamma_2) \text{ кг м}^2. \quad (64)$$

Независимо от подачи газов в рабочую камеру за счет естественной тяги, печи часто снабжают дымовыми трубами, создающими геометрический напор, необходимый для удаления отходящих газов, т. е. для преодоления сопротивлений на пути дымовых газов и отвода их на значительной высоте.

Старые печи снабжали исключительно дымовыми трубами. Дымовые трубы представляют собой надежные приспособления, для работы которых требуются только достаточно нагретые газы (обычно выше 150°). Интенсификация работы печей, связанная с увеличением сопротивлений на пути газов (более 20—25 мм вод. ст.), а также улучшение использования тепла отходящих газов, вызвавшее понижение температуры отходящих газов, а следовательно и тяги, обусловили переход к искусственной тяге, вернее к принудительному отведению газов и подаче дутья. Приспособления для создания искусственной тяги не дают возможности отказаться от установки дымовых труб в качестве резерва или для отведения газов на достаточной высоте, где они безвредны для населения и растительности. Возможна также комбинация искусственной и естественной тяги.

Дымовые трубы

Отведение продуктов горения при помощи дымовой трубы основано на использовании геометрического напора газов. Столб воздуха и нагретых печных газов выталкивает более легкий столб газов в дымовой трубе (рис. 87). Выталкивающая сила должна быть достаточна для преодоления сопротивлений в печи; кроме того, она должна обеспечивать некоторый запас напора.

Теоретическая величина разрежения, создаваемого дымовой трубой (рис. 87):

$$h = H \left(\frac{\gamma_{a,0}}{1 + \alpha t_a} - \frac{\gamma_{d,0}}{1 + \alpha t_{d,p}} \right) \text{ кг м}^2, \quad (65)$$

где: $\gamma_{a,0}$ — удельный вес воздуха при нормальных условиях в кг/м³;

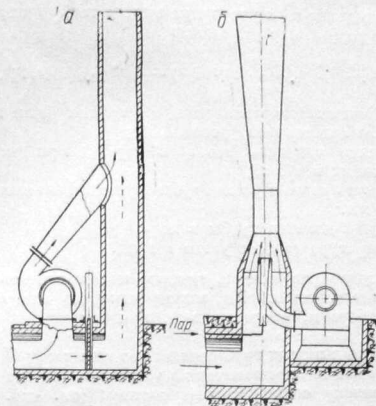


Рис. 9. Схема использования искусственной тяги: а) прямого действия (при закрытом шибере); б) косвенного действия (показана установка реверсивного парового эжектора).

$\gamma_{d,0}$ — удельный вес отходящих газов при нормальных условиях в кг/м³;

t_a — температура воздуха в град.;

$t_{d,p}$ — температура отходящих газов, средняя по высоте трубы в град.;

α — коэффициент объемного расширения газов, равный 0,00366 1/град.;

H — высота трубы, считая от середины дымового бора до устья трубы, в м.

При расчете дымовой трубы следует учитывать падение температуры газов по высоте, составляющее при температуре дымовых газов 200—300°:

$$\Delta t = \frac{A}{\sqrt{D}} \text{ } ^\circ\text{м, град.} \quad (66)$$

где: D — внешний диаметр трубы в м;

A — величина, равная для кирпичных труб при толщине стенки больше 1 м — 0,2 и при толщине меньше 0,5 м — 0,4 и для железных труб 2.

Действительное разрежение, измеряемое у основания дымовой трубы, меньше теоретического на величину сопротивлений в трубе

от трения по длине и от удара при выходе газов из трубы. Действительное разрежение равняется:

$$h_{\text{действ}} = h - \xi \frac{w_{cp,o}^2}{2g} \gamma_{a,o} \frac{H}{d_{cp}} (1 + \alpha t_{cp}^2) - \frac{w_{a,o}^2}{2g} \gamma_{a,o} (1 + \alpha t_{cp}^2), \quad (67)$$

где: ξ — коэффициент сопротивления от трения (для кирпичной трубы приближенно равен 0,05);

$w_{cp,o}$ — средняя скорость газов в трубе при нормальных условиях в м/сек.;

$w_{a,o}$ — скорость газов в устье трубы при нормальных условиях в м/сек.;

d_{cp} — средний диаметр трубы в м;

t_{cp}^2 — температура газов в устье в град.

Максимальное разрежение, которое может создать дымовая труба при отсутствии потерь, можно измерить при опущенном дымовом шибере и, следовательно, при отсутствии движения газов.

При расчете дымовых труб определяют их высоту H и диаметр устья d_y . Высота H определяется из уравнения (65) по подымаемому полному сопротивлению системы (см. стр. 21). При подсчете учитывают сопротивления местные (h_m), от трения (h_{mp}) и связанные с преодолением геометрического напора (h_g) нагретых полостей, по которым движутся газы. Последние берут со знаком минус, если создаваемый геометрический напор способствует движению газов. Таким образом:

$$h = K (h_m + h_{mp} \pm h_g), \quad (68)$$

Коэффициент K учитывает некоторый запас (обычно 20—40%) на случай форсировки работы или засорений. Площадь устья трубы определяется с таким расчетом, чтобы скорость выхода газов предупреждала возможность задувания их при ветре. Действительная скорость газов в устье принимается равной 3—6 м/сек. Кирпичные трубы, кладка которых ведется изнутри, делают диаметром не менее 600 мм. Для увеличения скорости выхода газов при малой нагрузке в устье трубы устанавливают конус-сузитель.

При определении нижнего и среднего диаметров кирпичной трубы следует учитывать, что уклон стен ее составляет приблизительно 0,01. Высота дымовых труб составляет минимально 16 м из условий необходимости отведения газов на высоте, обеспечивающей безвредность их для животных и растений.

Труба может обслуживать несколько печей. При подведении к трубе нескольких боров у основания ее устанавливают перегородки высотой в 2—4 м, предупреждающие возможность воздействия газовых потоков друг на друга. Дымовые боровы снабжают самостоятельными шиберами.

Искусственная тяга (нагнетание, отсасывание) может быть создана паровым эжектором или вентилятором.

Эжекция паром применяется как для подачи воздуха под давлением, так и для отвода отходящих газов; при этом создается необходимое разрежение.

Нагнетание вентилятором применяется чаще. Большое сопротивление системы вызывает необходимость поддерживать значительное давление, и в результате возникает утечка дутья или печных газов.

Отсасывать газы можно вентилятором путем просасывания через него печных газов (тяги прямого действия), или эжектируя газы воздухом, или паром, или частью печных газов (тяги косвенного действия).

При низкой температуре газов и малом потребном разрежении тягу прямого действия можно осуществить пропеллерным вентилятором, установленным в дымовом борове.

При значительных потребных давлениях или высоких температурах газов применяют центробежные вентиляторы, входное отверстие которых присоединяют к борову, а выходное — к дымовой трубе. При температуре газов 200—250° подшипники вентиляторов, а иногда и вал, охлаждают водой. При более высокой температуре газы охлаждают, примешивая к ним холодный воздух или впрыскивая воду.

При косвенной тяге струя воздуха или отходящих газов эжектирует последние. Смесь газов отводит через расширяющуюся трубу — диффузор.

При отсасывании газов и большом сопротивлении системы отдельные части печи находятся под большим разрежением. Это вызывает присасывание наружного воздуха через неплотности и отверстия.

Часто в печах одновременно используют естественную и искусственную тяги. Так, можно одновременно нагнетать в печь газ и воздух и отводить дымовой трубой отходящие газы. Можно подавать в печь газ и воздух за счет естественной тяги и отсасывать отходящие газы с помощью искусственной тяги. Можно нагнетать вентиляторами в печь газ и воздух и искусственно отсасывать отходящие газы. Естественную тягу можно усилить, искусственно нагнетая или отсасывая газы.

Совместное применение отсасывания и нагнетания называют уравновешенной тягой. Оно позволяет поддерживать в печи требуемое положительное или отрицательное давление определенной величины и избежать излишнего выбивания газов или присасывания воздуха.

Эжекторы

Когда струя газа вытекает из узкой трубы в широкую, внутри вытекающей струи образуется разрежение, вызывающее, при

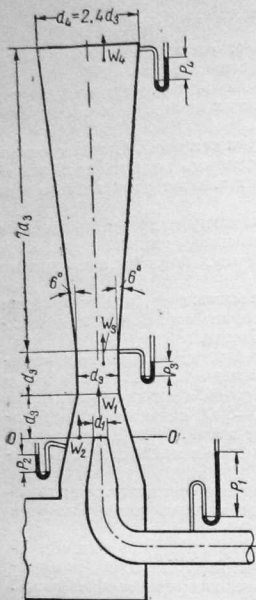


Рис. 10. Эжектор.

наличия отверстий в широкой трубе, присасывание газов из внешней среды через поверхность расширяющейся струи. Подобное устройство называется эжектором.

При широкой цилиндрической трубе эжектирующее действие невелико вследствие больших потерь при вытекании газов. Труба в виде диффузора уменьшает потери и увеличивает количество присасываемого газа.

Для уменьшения потерь, связанных со сжатием газа, поступающего извне в широкую трубу, кромки последней закругляют.

Для увеличения скорости выхода газов из узкой трубы применяют суживающиеся сопла. При превышении критической скорости выхода наконечнику придают вид вначале суживающегося, а затем расширяющегося сопла.

Когда струя одного газа засасывается другой, газы хорошо перемешиваются. Следовательно, эжектор (рис. 10) служит для транспортирования и для перемешивания газов.

Принцип эжекции используют в газовых горелках для подсыпания газа и воздуха и их смешения, в приспособлениях для отвода отходящих газов и в пароструйных приборах для подачи воздуха для горения и газификации.

Чтобы уменьшить потери пароструйные приборы делают многоступенчатыми и воздух засасывают как паром, так и паровоздушной смесью. Подобные приборы называют инжекторами.

Методика расчета эжекторов и инжекторов низкого давления (см. рис. 10) разработана Н. Н. Доброхотовым. Этот расчет следует производить на основании закона сохранения количества движения при смешении газовых потоков:

$$M_1 w_1 + M_2 w_2 = (M_1 + M_2) w_3, \quad (69)$$

где: M_1 —масса первого газа, поступающая в секунду, в $\frac{\text{кг сек}}{\text{м}}$;

M_2 —масса второго газа, поступающая в секунду, в $\frac{\text{кг сек}}{\text{м}}$;

w_1 —скорость первого газа, в м/сек.;

w_2 —скорость второго газа, в м/сек.;

Величина M определяется из выражения:

$$G = gM,$$

где: G —вес тела в кг.;

$g = 9,81$ м/сек.²—ускорение от земного притяжения;

$G_1 = \gamma_1 V_1$ —весовое количество первого газа, поступающего в секунду, в кг/сек.;

$G_2 = \gamma_2 V_2$ —весовое количество второго газа, поступающего в секунду, в кг/сек.

Наилучший (наивыгоднейший) размер поперечного сечения горла диффузора получается тогда, когда количество движения газового потока в горле равно сумме количеств движения смешиваемых потоков, т. е. когда

$$w_3 = \frac{M_1 w_1 + M_2 w_2}{M_1 + M_2}. \quad (70)$$

В таком правильно построенном смесителе потоки газов смешиваются с минимальной потерей энергии, т. е. с минимумом завихрений.

Разность статических давлений между устьем и горлом диффузора, т. е. приращение статического давления в диффузоре, получается по закону Бернулли за счет уменьшения скоростного напора газов равной:

$$P_4 - P_3 = \gamma_0 \frac{w_3^2 - w_1^2}{2g} \gamma_3, \quad (71)$$

где: γ_0 —коэффициент полезного действия диффузора;

γ_3 —удельный вес смеси в кг/м³;

$$\gamma_3 = \frac{G_1 + G_2}{V_1 + V_2} = \frac{\gamma_1 V_1 + \gamma_2 V_2}{V_1 + V_2}. \quad (72)$$

Значением величины w_3^2 , по сравнению со значением величины w_1^2 , можно пренебречь; тогда приращение статического давления в диффузоре равно приблизительно:

$$P_4 - P_3 = \gamma_0 \frac{w_1^2}{2g} \gamma_3. \quad (73)$$

Получающаяся от этого ошибка можно компенсировать некоторым уменьшением величины γ_0 . Для хорошо выполненного диффузора с гладкими стенками $\gamma_0 = 0,8$.

Давление p_4 при небольшой скорости w_2 приблизительно равно давлению p_3 ; давление p_2 превышает давление p_3 на скоростной напор эжектируемого газа в сечении $\theta=0$, т. е.

$$p_2 - p_3 = \frac{\alpha_1^2}{2g} \gamma_2, \quad (74)$$

Скорость истечения эжектируемого газа из сопла при небольших его давлениях равна:

$$w_1 = \sqrt{\frac{2g(p_1 - p_3)}{\gamma_1}}. \quad (75)$$

где p_1 — давление эжектирующего газа перед выходом из сопла в эжектор, т. е. после клапана, регулирующего давление этого газа.

Под p_1 ; p_2 ; p_3 ; p_4 подразумевают манометрическое (избыточное сверх атмосферного) давление, выраженное в кг/м^2 или в мм вод. ст. Давление ниже атмосферного, т. е. величина разрежения, берется с отрицательным знаком.

При расчете эжектора задаются следующие величины: V_2 ; d_2 ; w_2 ; γ_1 ; γ_2 ; p_2 ; p_3 ; p_4 (d_2 диаметр эжектора в плоскости сопла). Требуется определить количество эжектирующего газа V_1 $\text{м}^3/\text{сек.}$, если известно его давление p_1 , или же давление эжектирующего газа p_1 , если известно его количество V_1 . Кроме того, требуется определить размеры эжектора, т. е. d_1 ; d_2 и d_4 .

При расчете инжекционных газовых горелок известны величины: V_1 ; V_2 ; γ_1 ; γ_2 ; w_3 ; p_3 ; p_5 ; p_4 .

Требуется определить давление эжектирующего газа, т. е. p_1 , а также размеры инжектора, т. е. d_1 ; d_2 ; d_3 и d_4 .

Из уравнений (73), (74) и (75) получаем основное уравнение с одним неизвестным для расчета эжекторов и инжекторов:

$$p_4 - p_3 = \eta_0 \frac{(V_1 \gamma_1 w_1 + V_2 \gamma_2 w_2)^2}{2g(V_1 \gamma_1 + V_2 \gamma_2)(V_1 + V_2)}. \quad (76)$$

Если неизвестна скорость истечения эжектирующего газа из сопла, т. е. w_1 , то определив ее значение, можно определить давление газа p_1 , по уравнению:

$$p_1 - p_3 = \frac{w_1^2}{2g} \gamma_1. \quad (77)$$

Смесь газов должна вытекать из конца диффузора в заданное пространство, обладающее некоторым давлением p_4 . Для того, чтобы в газовой инжекционной горелке пламя не затекало внутрь ее, конец диффузора суживают и в нем делают небольшое отверстие, через которое смесь газа с воздухом вытекает из диффузора в туннель горелки со скоростью w_3 , равной около 10 м/сек. Давление смеси газов в конце диффузора, т. е. p_4 , равно:

$$p_4 = p_0 + \frac{w_3^2}{2g} \gamma_3. \quad (78)$$

Вентиляторы

В пропеллерных вентиляторах газы движутся вдоль оси. Их используют для перемещения больших количеств газа при малом сопротивлении — обычно не более 25 мм вод. ст. Специальные конструкции вентиляторов (ЦАГИ) создают и большие давления (100 мм вод. ст. и выше). К. п. д. распространенных пропеллерных вентиляторов Сирокко низок (0,2—0,4), а вентиляторов ЦАГИ значительно выше (0,6—0,75).

В центробежном вентиляторе газ отбрасывается к периферии лопатками, расположенными радиально, приобретая скорость, равную скорости движения лопаток. Приобретенная газом кинетическая энергия по выходе газа из колеса в спиральеобразный кожух-диффузор преобразуется в статический напор.

Центробежные вентиляторы бывают высокого (200—1000 мм вод. ст.), среднего (80—200 мм) и низкого (менее 80 мм) давления.

Вентиляторы высокого давления характеризуются малой производительностью при высоком давлении, вентиляторы низкого давления — высокой производительностью при малом давлении.

Суммарное давление, создаваемое вентилятором, складывается из динамического напора, необходимого для сообщения газу скорости, и статического давления, необходимого для преодоления сопротивлений движению газов:

$$h_{\text{сум}} = h_{\text{стат}} + h_{\text{динк}}$$

Суммарное давление, создаваемое вентилятором, пропорционально квадрату диаметра колеса и квадрату числа оборотов. Производительность вентилятора пропорциональна числу оборотов. Потребляемая мощность пропорциональна кубу числа оборотов.

С увеличением сопротивления требуемая мощность падает вследствие уменьшения количества проходящего газа. Для сохранения количества перемещаемого газа должно быть изменено число оборотов вентилятора.

Требуемая для создания напора в h мм вод. ст. мощность N_g при расходе газа в V $\text{м}^3/\text{сек.}$ составляет при к. п. д. вентилятора η_g :

$$N_g = \frac{Vh}{75\eta_g} \text{ л. с.} \quad (79)$$

К. п. д. вентилятора $\eta_g = 0,4 \div 0,6$, если h отнесено к статическому давлению, и $\eta_g = 0,5 \div 0,75$, если h отнесено к суммарному давлению.

При подборе вентиляторов, определяют по заданной производительности и статическому (или полному) напору число оборотов, диаметр колеса и расход энергии. Обычно в таблицах и характеристиках приводят данные для «стандартного» воздуха с температурой 20° и относительной влажностью 50%. Мощность мотора должна быть на 10—15% больше мощности вентилятора.

11. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОВ

Надежные эмпирические формулы для определения числовых значений коэффициентов сопротивления имеются лишь для основных, наиболее распространенных случаев движения жидкостей.

Использование таких формул в ряде случаев приводит к ошибкам и большим неточностям вследствие отличия условий движения и жидкости, принятых при выведении формулы, от имеющих место в действительности.

Изучение законов теплообмена и гидравлического сопротивления, а также установление эмпирических зависимостей, необходимых для расчета тепловых агрегатов, производят на экспериментальных установках, в которых геометрические, гидромеханические и тепловые условия подобны действительным условиям, то-есть методом моделей. Этот метод позволяет изучить характер движения рабочей жидкости, гидравлическое сопротивление газопотоков и теплообмен в них на уменьшенных моделях, в которых вместо горячих газов движутся холодный воздух, вода или же какая-либо другая жидкость с низкой температурой.

Впервые применил теорию подобия для изучения тепловых аппаратов на моделях академик М. В. Кирпичев, который разработал теорию моделирования и практически ее внедрил. Метод моделирования получил широкое распространение и признание и является одним из основных средств изучения тепловых агрегатов.

Необходимыми и достаточными условиями подобия являются: 1) геометрическое подобие, 2) подобие условий движения жидкости при входе, 3) подобие физических параметров в сходственных точках модели и образца (постоянство отношений плотностей, коэффициентов вязкости и др.), 4) подобие температурных полей на границах, 5) одинаковость значений определяющих критериев. Последнее условие подобия достаточно установить в каком-либо одном сходственном сечении.

Все условия подобия могут быть осуществлены лишь в редких случаях. Возможно приближенное моделирование. Это результаты следующих свойств движения вязкой жидкости: стабильности и автоматности.

Стабильностью называется свойство вязкой жидкости принимать вполне определенное распределение скоростей, определяемое значением числа Re и относительной длиной пройденного участка пути. При тождественности этих факторов распределение скоростей получается подобным.

С увеличением Re распределение скоростей вначале изменяется очень сильно, а потом остается постоянным. Независимость характера движения от Re называется автоматностью. В области автоматного движения подобия $Re = idem$ можно не соблюдать.

Геометрическое подобие достигается построением модели по конфигурации, точно копирующей образец.

Подобие условий входа жидкости достигается путем устройства входного участка, геометрически подобного входному участку образца. Свойство стабильности при этом обеспечивает подобие условий движения.

Подобие физических параметров требует постоянства относительных физических параметров во всех сходственных точках, что

трудно выполнимо. Это условие соблюдается в случае постоянства температуры в образце. В случае ее непостоянства изменение температуры в образце и модели должно протекать подобным образом, что невозможно осуществить в полном объеме. Это условие при вынужденном движении соблюдают приближенно, осуществляя в модели изотермический процесс движения, соответствующий какой-то средней температуре рабочей жидкости в образце.

Подобие температурных полей на границах осуществить трудно. Поэтому применяется метод локального теплового моделирования. При этом подобие температурных полей осуществляется в том месте, где исследуется теплопередача и соблюдены условия механического подобия.

Однаковость в образце и модели определяющих критериев точно выполнима лишь в случае изотермического движения. Для тепловых аппаратов она выполняется приближенно, так же как и подобие физических параметров. При вынужденном движении необходимо только соблюдать условия $Re = idem$. В случае автоматности это условия отпадает.

При изучении теплообмена соблюдается также условие равенства критериев Прандтля (Pr). При изучении свободного движения необходимо соблюдать условия равенства комплексов Gr. Pr (Gr—критерий Грасгофа):

$$Pr = \frac{\nu \kappa}{a} \quad (80)$$

и

$$Gr = \frac{\beta g l^2 \Delta t}{\nu^2} \quad (81)$$

где: $\nu \kappa$ — коэффициент кинематической вязкости в $m^2/сек.$;

a — коэффициент температуропроводности в $m^2/сек.$;

β — коэффициент объемного расширения в $1/град.$;

g — ускорение силы тяжести в $m/сек^2.$;

l — длина в м;

Δt — разность температур в град.

Возможно применение огневых моделей — печей малых размеров, подобных действительным печам. Факел пламени, получающийся в печах, является результатом сложного взаимодействия гидродинамических явлений, диффузии, теплоотдачи излучением и конвекцией и химических превращений. Огневые модели могут быть осуществлены в порядке приближенного подобия. При этом в модели можно выделить основной, подлежащий исследованию процесс, в отношении которого должно быть во возможности соблюдено точное подобие.

ТЕПЛОБМЕН В РАБОЧЕЙ КАМЕРЕ

Большинство печей силикатной промышленности отопляется продуктами горения топлива, и интенсивность их работы зависит от теплообмена в области газовой среды и скорости прогрева нагреваемых материалов или изделий.

Ниже рассматриваются вопросы теплообмена излучением, теплообмена в пламенном пространстве печей и теплопередачи в нестационарном тепловом потоке, применительно к особенностям условий работы печей.

1. ТЕПЛОБМЕН В ПЛАМЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Источником тепла в рабочей камере является факел пламени. Теплоотдача от него происходит преимущественно излучением. Роль конвекции при высоких температурах невелика. При температуре печи выше 1200° и степени черноты пламени 0,2 и выше на долю конвекции падает не более 5–10% общего количества передаваемого тепла.

Факел пламени, кладка и нагреваемые материалы обмениваются излучением. Лучистый поток, падающий на кладку и нагреваемый материал, частично поглощается и частично отражается. Отраженный поток суммируется с собственным излучением. Вследствие частичной прозрачности, характеризующей степенью черноты (доля излучательной способности абсолютно черного тела, имеющего температуру газа), факел поглощает часть падающего на него потока, а часть пропускает. Таким образом, нагреваемый материал приобретает тепло за счет суммарной теплоотдачи от газов и кладки.

Иногда нагреваемый материал частично прозрачен для излучения. Таким материалом, например, является стекломасса. В этом случае в лучистом теплообмене принимают участие и глубинные слои материала и кладка сосуда, в котором материал находится.

Излучение пламени зависит от содержания в нем многоатомных газов (CO_2 , H_2O) и частичек сажи — продукта разложения углеводородов. Последние вызывают свечение пламени — зрительное ощущение, в известной мере, однако, недостаточно точно, характеризующее степень черноты пламени.

Газы имеют полосатый спектр. Излучательная способность их зависит от парциального давления газа p ат и эффективной толщины слоя S м (рис. 11 и 12). Излучение CO_2 и H_2O про-

порционально соответственно T^4 и T^3 . Для упрощения расчетов принимаются пропорциональность T^4 и переменная степень черноты.

Суммарный поток излучения смеси газов меньше суммы их отдельных потоков излучений вследствие частичного совпадения полос излучения и взаимного поглощения излучаемой энергии (поправка 2—4%, рис. 14).

Расчетная формула ВТИ (В. Н. Тимофеев) для лучистого теплообмена между газом и оболочкой, заполненной этим газом:

$$q_{\text{в.кл.}} = C_{\epsilon} \epsilon_{\text{г}} \left(\frac{T_{\text{г}}}{10} \right)^4 A_{\text{стн}} \text{ кал/м}^2 \text{ час,} \quad (1)$$

где: $A_{\text{стн}}$ — поправка на обратное излучение стенки (кладки)

$$A_{\text{стн}} = 1 - \left(\frac{T_{\text{к}}}{T_{\text{г}}} \right)^{3,5} \quad (2)$$

$T_{\text{г}}$ и $T_{\text{к}}$ — температура соответственно газов и оболочки, в °К,

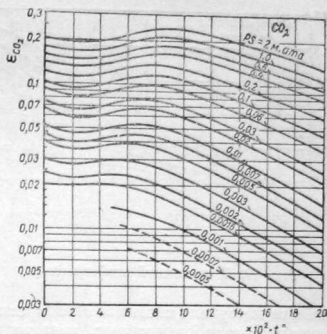
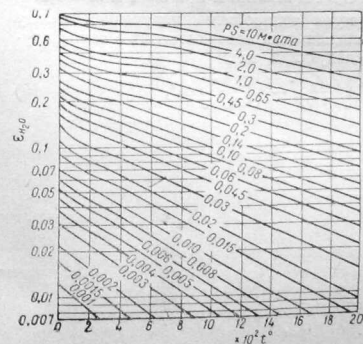
$q_{\text{в.кл.}}$ — количество тепла, передаваемого излучением от газов оболочке, в кал/м² час;

$\epsilon_{\text{г}}$ — степень черноты газа при температуре газа $T_{\text{г}}$:

$$\epsilon_{\text{г}} = \epsilon_{\text{CO}_2} + \beta \epsilon_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta \epsilon_{\text{г}}, \quad (3)$$

$\Delta \epsilon_{\text{г}}$ — обратный член на совместное лучепускание CO_2 и H_2O (рис. 14);

β — поправочный коэффициент на парциальное давление H_2O (рис. 13);

Рис. 11. Степень черноты CO_2 .Рис. 12. Степень черноты H_2O .

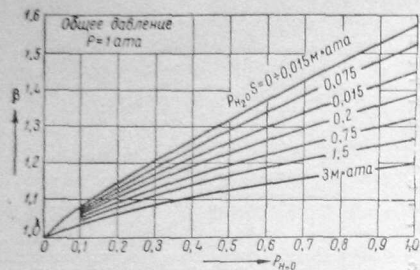


Рис. 13. Поправочный коэффициент β .

свойства материала кладки и многократность отражений, которые имеют место в рабочей камере, каналов и теплообменных устройствах, можно считать, что излучение их поверхностей достаточно близко к излучению черного тела.

На рис. 11 и 12 степень черноты газов приведена в зависимости от величины pS — поглощательной способности газов.

Эффективная толщина слоя S определяется из выражения:

$$S = m \frac{V}{F} \text{ м,} \quad (4)$$

где: V — объем, в котором заключен газ в м^3 ;

F — поверхность стенок, ограничивающих объем в м^2 ;

m — коэффициент; при $S > 1 \text{ м}$ $m = 3,6$ и при $S < 1 \text{ м}$ $m = 3,4$.

В общем случае формула теплообмена излучением между двумя произвольно расположенными поверхностями с температурами T_1 и T_2 °К имеет следующий вид:

$$Q = C_4 F \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \psi \epsilon', \quad (5)$$

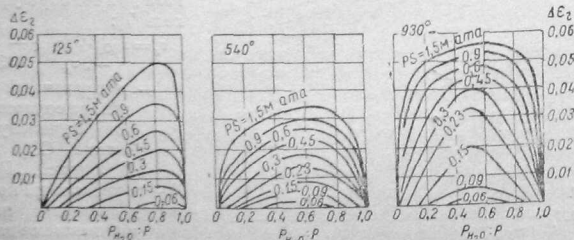


Рис. 14. Поправка на совместное излучение CO_2 и H_2O ; P — суммарное давление CO_2 и H_2O .

C_4 — коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный $4,96 \text{ кал/м}^2 \text{ час}$ ($^\circ\text{K}$ 100).

Расчетное уравнение (1) ВТИ для подсчета излучения газов применимо только для поверхностей, коэффициент излучения которых близок к коэффициенту излучения абсолютно черного тела. Учитывая

где: Q — результирующий расход тепла в кал/час;

F — площадь одной из поверхностей в м^2 ;

ψ — угловой коэффициент;

ϵ' — приведенная степень черноты.

Степень черноты пламени характеризуется выражением:

$$\epsilon = 1 - e^{-x}, \quad (6)$$

где: e — основание натуральных логарифмов равно 2,718;

x — сила поглощения, зависящая от толщины слоя и поглощательной способности газов.

Степень черноты светящегося пламени зависит от содержания и состава углеводородов в горючем газе, коэффициента избытка воздуха и качества перемешивания горючего и воздуха.

Для практических случаев можно принимать следующие ориентировочные и требующие дополнительного подтверждения величины степени черноты факела при его толщине, близкой к 0,6 м:

очищенный генераторный газ . . . 0,13—0,20

неочищенный генераторный газ . . . 0,2—0,5

природный газ и мазут . . . 0,5—0,8

несветящийся факел природного газа . . . 0,2

Расчеты теплообмена в пламенном пространстве печи позволяют установить зависимость количества тепла, передаваемого нагреваемым материалам от различных факторов, а также влияние размеров отдельных частей пламенного пространства и размеров, положения и свойств факела.

Расчет теплообмена в пламенном пространстве чрезвычайно сложен. Степень черноты и температура факела пламени и температура кладки неравномерны. Факел не имеет правильной геометрической формы. В теплообмене принимают участие промежуточные слои газов между факелом, кладкой и материалом. Трудно учитывается и геометрический фактор (угловые коэффициенты) теплообмена между материалом, факелом и кладкой.

Дополнительное усложнение создает изменение во времени температурного поля в пламенном пространстве регенеративных печей, а также отсутствие надежных данных о коэффициентах излучения обменивающихся излучением поверхностей. Поэтому расчеты теплообмена в пламенном пространстве печи можно произвести лишь, приняв ряд упрощающих предположений и пользуясь эффективными значениями основных физических параметров, подстановка которых в формулы, выражающие законы теплообмена, дает результат, соответствующий эксперименту.

При практических расчетах по тому или иному закону производят усреднение температур и степени черноты газов. Далее принимают, что пламенное пространство целиком заполнено газом с равномерной степенью черноты или же учитывают факельный характер горения. В последнем случае допускают, что факел, имеющий определенную геометрическую форму и равномерную степень черноты, находится в среде газов, имеющих другую, также

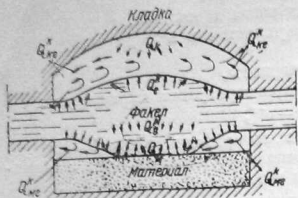


Рис. 15. Схема теплообмена в рабочей камере.

равномерную степень черноты. Принимают также, что кладка и нагреваемый материал обладают диффузным отражением. Температуру кладки в различных частях печи в соответствии с опытными данными часто принимают различной.

Во вращающихся печах учитывают изменение температуры кладки в зависимости от положения ее по отношению к нагреваемому

материалу, т. е. ее регенеративное действие.

Если степень черноты кладки больше 0,8, то погрешность, вызванная пренебрежением отраженными потоками, сравнительно невелика и меньше 10%. Вместе с тем, отказ от учета отраженных потоков значительно упрощает расчеты.

Расчет теплообмена в пламенном пространстве при равномерной степени черноты газов, заполняющих пламенное пространство, предложен В. Н. Тимофеевым. Он составляет общий баланс энергии каждой поверхности, участвующей в теплообмене излучением в рабочей камере, и лучистые потоки выражает в виде полных количеств излучаемой энергии.

Количество тепла, посылаемого на поверхность нагреваемого материала лучиспусканием, складывается из следующих статей (рис. 15):

а) тепла, посылаемого на материал факелом:

$$Q_{ф,м}^M = C_{ф,м} F_{ф,м} T_{ф,м}^4 \text{ кал/час,} \quad (7)$$

где: $C_{ф,м}$ — коэффициент излучения факела в $\text{кал/м}^2 \text{ час } (^\circ\text{K})^4$;

$F_{ф,м}$ — поверхность материала в м^2 ;

$T_{ф,м}$ — температура факела в $^\circ\text{K}$;

б) тепла, посылаемого кладкой:

$$Q_{к,м}^M = Q_{к,м} (1 - \varepsilon_{к,м}) \varphi_{к,м} \text{ кал/час,} \quad (8)$$

где: $Q_{к,м}$ — полное тепло, излучаемое кладкой в кал/час ;

$\varphi_{к,м}$ — доля тепла, посылаемого кладкой на материал из ее общего излучения;

$\varepsilon_{к,м}$ — степень черноты факела.

Все тепло, посылаемое на материал:

$$Q^M = C_{ф,м} F_{ф,м} T_{ф,м}^4 + Q_{к,м} (1 - \varepsilon_{к,м}) \varphi_{к,м} \text{ кал/час.} \quad (9)$$

Из этого количества тепла материал поглощает часть ($\varepsilon_{м,к}$), а остальное отражает.

Тепло, излучаемое материалом, состоит из тепла отраженного и тепла собственного излучения:

$$Q_{м,к} = Q^M (1 - \varepsilon_{м,к}) + C_{м,к} T_{м,к}^4 F_{м,к} \text{ кал/час,} \quad (10)$$

где: $C_{м,к}$ — коэффициент излучения материала в $\text{кал/м}^2 \text{ час } (^\circ\text{K})^4$;

$T_{м,к}$ — температура материала в $^\circ\text{K}$.

Тепло, получаемое материалом от факела посредством конвективной теплоотдачи:

$$Q_{к,м}^K = F_{к,м} (T_{ф,м} - T_{м,к}) \alpha_{к,м} = F_{к,м} q_{к,м} \text{ кал/час.} \quad (11)$$

где $\alpha_{к,м}$ — коэффициент теплоотдачи от газов материалу в $\text{кал/м}^2 \text{ час град}$.

Количество тепла, приобретаемое материалом:

$$Q = Q^M - Q_{м,к} = [C_{ф,м} F_{ф,м} T_{ф,м}^4 + Q_{к,м} (1 - \varepsilon_{к,м}) \varphi_{к,м} + F_{к,м} q_{к,м} - C_{м,к} T_{м,к}^4 F_{м,к}] \varepsilon_{м,к} + \dots \quad (12)$$

Количество тепла, получаемого кладкой, складывается из следующих статей:

а) тепла, посылаемого факелом:

$$Q_{ф,к}^K = C_{ф,к} F_{ф,к} T_{ф,к}^4 \text{ кал/час,} \quad (13)$$

где $F_{ф,к}$ — поверхность кладки в м^2 ;

б) тепла, посылаемого материалом:

$$Q_{м,к}^K = Q_{м,к} (1 - \varepsilon_{к,м}) \text{ кал/час,} \quad (14)$$

в) тепла посылаемого кладкой «на себя» (например, от свода на стенку):

$$Q_{к,к}^K = Q_{к,к} (1 - \varepsilon_{к,к}) \varphi_{к,к} \text{ кал/час;} \quad (15)$$

где $\varphi_{к,к}$ — доля общего излучения кладки, посылаемая на себя.

Так как кроме кладки и материала других обменивающихся телом поверхностей нет, то:

$$\varphi_{к,к} = 1 - \varphi_{к,м}; \quad (16)$$

г) тепла, получаемого от факела посредством конвективной теплоотдачи:

$$Q_{к,к}^K = F_{к,к} (T_{ф,к} - T_{к,к}) \alpha_{к,к} = F_{к,к} q_{к,к} \text{ кал/час,} \quad (17)$$

где $\alpha_{к,к}$ — коэффициент теплоотдачи от газов кладке в $\text{кал/м}^2 \text{ час град}$.

Тепло, расходуемое кладкой за счет теплопроводности на потери в окружающую среду:

$$Q_{ок,к} = F_{ок,к} q_{ок,к} \text{ кал/час,} \quad (18)$$

где $q_{ок,к}$ — потери кладкой в окружающую среду в $\text{кал/м}^2 \text{ час}$.

Энергетический баланс кладки:

$$Q_{к,к} - Q_{ок,к} = Q_{к,к}^K + Q_{к,к}^K + Q_{к,к}^K + Q_{к,к}^K - Q_{к,к}^K = C_{ф,к} F_{ф,к} T_{ф,к}^4 + Q_{к,к} (1 - \varepsilon_{к,к}) \varphi_{к,к} + Q_{к,к} (1 - \varepsilon_{к,к}) + F_{к,к} (q_{к,к} - q_{ок,к}). \quad (19)$$

Решая совместно уравнения (9), (12) и (19) и производя соответствующие преобразования, получаем уравнение, опреде-

ляющее количество тепла, полученное поверхностью материала в рабочем пространстве печи:

$$Q = C_{\varepsilon_M} \frac{\varphi_M(1-\varepsilon_1) + 1 + \frac{\varepsilon_M(q_{\kappa} - q_{0\kappa})(1-\varepsilon_1) + q_{\kappa M}(\varphi_M(1-\varepsilon_1) + [\varepsilon_M + \varepsilon_1(1-\varepsilon_M)] + \varepsilon_2)}{\varepsilon_M C_{\varepsilon_1}(T_{\kappa}^4 - T_M^4)}}{\varphi_M(1-\varepsilon_1) [\varepsilon_M + \varepsilon_1(1-\varepsilon_M)] + \varepsilon_1} \times \times F_M (T_{\kappa}^4 - T_M^4) \text{ кал/час.} \quad (20)$$

Здесь принято:

$$\varphi_M = \frac{F_M}{F_{\kappa}}. \quad (21)$$

Принимая выражение перед множителем $F_M(T_{\kappa}^4 - T_M^4)$ равным $C'_{M\kappa}$, получаем:

$$Q = C'_{M\kappa} F_M (T_{\kappa}^4 - T_M^4). \quad (22)$$

Коэффициент $C'_{M\kappa}$ называют условным или видимым коэффициентом излучения.

Если температура материала и газов меняется во времени или пространстве, то расчеты ведут для отдельных отрезков времени или пространства.

Температура газов определяется из выражения:

$$T_{\kappa}^4 = T_{\varepsilon_1, M}^4 \cdot T_{\nu}^4, \quad (23)$$

где: T_{ν} — температура продуктов горения на выходе из рабочей камеры;

$T_{\varepsilon_1, M}$ — определяется (см. гл. V) из выражения:

$$T_{\varepsilon_1, M} = \frac{Q_{\kappa}^{\nu} + Q_{\kappa} + Q_{\kappa} - Q_{\kappa} - Q_{0\kappa}}{V_1 C_{\varepsilon_1}} + 273. \quad (24)$$

Чем меньше величина $\varphi_M = \frac{F_M}{F_{\kappa}}$, т. е. чем больше поверхность

кладки при постоянной величине поверхности нагреваемого материала, тем больше тепла передается излучением кладки.

Видимый коэффициент излучения в рабочем пространстве печи всегда больше коэффициента излучения факела. Особенно велико влияние кладки при малой излучательной способности факела. При $C_{\varepsilon} = 1 \cdot 10^{-8}$ кал/м² час (°К)⁴ видимый коэффициент излучения для $\varphi_M = 0,3$ составляет около 3.

Из формулы (20) следует, что с увеличением потерь в окружающую среду уменьшается количество тепла, получаемого материалом:

$$\Delta Q = F_{\kappa} q_{0\kappa} \frac{\varepsilon_M(1-\varepsilon_1)}{(1-\varepsilon_1) [\varepsilon_M + \varepsilon_1(1-\varepsilon_M)] + \frac{\varepsilon_1}{\varphi_M}}, \quad (25)$$

где ΔQ — уменьшение теплоотдачи материалу, в зависимости от потери в окружающую среду, в кал/час.

При совершенно непрозрачном факеле ($\varepsilon_2 = 1$) $\Delta Q = 0$ и потери в окружающую среду не влияют на теплоотдачу материалу.

При совершенно прозрачном факеле это влияние максимально и уменьшение теплоотдачи равно потерям в окружающую среду: $\Delta Q = F_{\kappa} q_{0\kappa}$.

Таким образом, влияние потерь особенно велико в печах, работающих на малосветящемся газе.

Температуру кладки для случая полного заполнения факелом пламенного пространства, равномерной температуры кладки и стационарного теплового режима можно определить, пользуясь уравнением:

$$Q_{\kappa}^1 - F_{\kappa} q_{0\kappa} = C_{\kappa} T_{\kappa}^4 F_{\kappa} + Q_{\kappa}^1 (1 - \varepsilon_{\kappa}). \quad (26)$$

Если потеря тепла в окружающую среду нет, то:

$$Q_{\kappa}^1 = \frac{C_{\kappa}}{\varepsilon_{\kappa}} F_{\kappa} T_{\kappa}^4 = C_{\kappa} F_{\kappa} T_{\kappa}^4. \quad (27)$$

где C_{κ} — коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный $4,96 \cdot 10^{-8}$ кал/м² час (°К)⁴.

Таким образом, кладка излучает как абсолютно черное тело, и температура кладки не зависит от коэффициента ее излучения.

При наличии потерь в окружающую среду температура кладки ниже:

$$T_{\kappa} = \sqrt[4]{\frac{Q_{\kappa}^1}{4,96 \cdot 10^{-8} F_{\kappa}} - \frac{q_{0\kappa}}{C_{\kappa}}}. \quad (28)$$

Влияние тепловых потерь на снижение температуры кладки мало и в обычных условиях составляет 2—3%.

Желательно, чтобы кладка отдавала материалу все воспринимаемое ею от газов тепло. Это могло бы иметь место, если бы кладка отражала все тепло, передаваемое ей излучением. Температура кладки была бы при этом низкой. Сколько-нибудь значительное снижение температуры кладки может иметь место лишь при очень малой, практически недостижимой величине C_{κ} . Для этого поглощающих свойства кладки должны быть близки к поглощающим свойствам металлических полированных поверхностей.

Температура кладки возрастает с увеличением температуры газов и материала и зависит от степени черноты газов и обмурованности $\frac{F_{\kappa}}{F_M}$ рабочей камеры.

При $\varepsilon_2 = 1$

$$T_{\kappa}^4 \approx T_{\kappa}^4, \quad (29)$$

температура кладки близка к температуре факела, так как нет теплообмена кладки с материалом.

При $\varepsilon_2 = 0$

$$T_{\kappa}^4 \approx T_M^4, \quad (30)$$

температура кладки приближается к температуре материала. Д. В. Гинзбург рассматривает теплообмен в пламенном пространстве печи с учетом факельного характера горения и наличия не-

скольких факелов. Отраженные потоки не учтены. Принято, что слои газов между факелами и кладкой совершенно прозрачны. Факелу приданы свойства серого излучателя с приведенной степенью черноты ε , пропускающего $(1-\varepsilon)$, падающего излучения и поглощающего ε . Температуры газов, кладки и стекломассы приняты средние эффективные.

В отличие от приведенных выше уравнений в рассматриваемом случае выражения, характеризующие теплообмен, написаны в виде результирующих потоков тепла.

В соответствии с изложенным, можно привести следующие равенства.

Количество тепла, отдаваемого излучением от газов кладке:

$$Q_{\varepsilon,к}^{\varepsilon} = \varepsilon C_k \psi_{к,ф} F_k \left[\left(\frac{T_g}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right] \text{ кал/час,} \quad (31)$$

где: ε_g — степень черноты факела;

C_k — коэффициент излучения кладки в $\text{кал/м}^2 \text{ час } \left(\frac{^{\circ}\text{K}}{100} \right)^4$;

F_k — поверхность кладки в м^2 ;

$\psi_{к,ф}$ — угловой коэффициент поверхности кладки на поверхность факелов;

T_g — температура газов в $^{\circ}\text{K}$;

T_k — температура кладки в $^{\circ}\text{K}$.

Количество тепла, отдаваемого газами кладке конвекцией:

$$Q_{\varepsilon,к}^{\alpha} = \alpha_{\varepsilon,к}^{\alpha} (T_g - T_k) F_k \text{ кал/час,} \quad (32)$$

где $\alpha_{\varepsilon,к}^{\alpha}$ — коэффициент теплоотдачи конвекцией от газов кладке в $\text{кал/м}^2 \text{ час град}$.

Количество тепла, отдаваемого газами материалу излучением:

$$Q_{\varepsilon,м}^{\varepsilon} = \varepsilon C_m \psi_{м,ф} F_m \left[\left(\frac{T_g}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right] \text{ кал/час,} \quad (33)$$

где: C_m — коэффициент излучения материала в $\text{кал/м}^2 \text{ час } \left(\frac{^{\circ}\text{K}}{100} \right)^4$;

F_m — поверхность материала в м^2 ;

$\psi_{м,ф}$ — угловой коэффициент поверхности материала на поверхность факелов;

T_m — температура материала в $^{\circ}\text{K}$.

Количество тепла, отдаваемого газами материалу конвекцией:

$$Q_{\varepsilon,м}^{\alpha} = \alpha_{\varepsilon,м}^{\alpha} (T_g - T_m) F_m \text{ кал/час,} \quad (34)$$

где $\alpha_{\varepsilon,м}^{\alpha}$ — коэффициент теплоотдачи конвекцией от газов материалу в $\text{кал/м}^2 \text{ час град}$.

Количество тепла, отдаваемого излучением материалу кладкой:

$$Q_{\varepsilon,м}^{\varepsilon} = C_{к,м} \left[\left(\frac{T_k}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right] [F_k \psi_{к,м} + F_k \psi_{к,м} (1 - \varepsilon_g)] = \\ = C_{к,м} (1 - \varepsilon_g a) \psi_{к,м} F_k \left[\left(\frac{T_k}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right] \text{ кал/час,} \quad (35)$$

где: $\psi_{к,м}$ — угловой коэффициент поверхности кладки на поверхность материала;

$\psi_{к,м}^{\prime}$ — то же, минуя факел;

$\psi_{к,м}^{\prime\prime}$ — то же, через факел;

$a = \frac{\psi_{к,м}^{\prime\prime}}{\psi_{к,м}}$ — величина, учитывающая наличие участков материала, не экранированных факелом;

$C_{к,м}$ — приведенный коэффициент излучения в $\text{кал/м}^2 \text{ час } \left(\frac{^{\circ}\text{K}}{100} \right)^4$.

Количество тепла, теряемого кладкой в окружающую среду:

$$Q_{к}^{\text{ок}} = K_k (T_g - 273) F_k \text{ кал/час,} \quad (36)$$

где K_k — общий коэффициент теплопередачи от газов в окружающую среду через кладку в $\text{кал/м}^2 \text{ час град}$.

Количество тепла, приобретаемого материалами:

$$Q = Q_{\varepsilon,м}^{\varepsilon} + Q_{\varepsilon,м}^{\alpha} + Q_{\varepsilon,м}^{\text{ок}}. \quad (37)$$

Баланс тепла кладки:

$$Q_{\varepsilon,к}^{\varepsilon} + Q_{\varepsilon,к}^{\alpha} = Q_{\varepsilon,к}^{\text{ок}} + Q_{к}^{\text{ок}}. \quad (38)$$

Если пренебречь разностью $Q_{\varepsilon,к}^{\alpha} - Q_{к}^{\text{ок}}$, то

$$Q_{\varepsilon,к}^{\varepsilon} = Q_{к,м}^{\varepsilon} \quad (39)$$

и

$$T_g = \sqrt[4]{T_k^4 + \frac{C_{к,м} (1 - \varepsilon_g a) \psi_{к,м} F_m}{C_{к,г} \psi_{к,ф} F_k} (T_k^4 - T_m^4)}. \quad (40)$$

Уравнение (40) показывает, что в случае лимитируемой температуры кладки T_k (опасность износа) увеличение отношений $\frac{F_m}{F_k}$ и $\frac{\psi_{к,м}}{\psi_{к,ф}}$, а также уменьшение величины a (уменьшение размеров факела), точно так же как и уменьшение степени черноты факела и температуры материала, увеличивает допустимую температуру факела.

Влияние коэффициента излучения кладки C_k невелико, так как с уменьшением величины C_k растет роль не учтенных отраженных потоков.

Ход расчета теплообмена (см. стр. 271) следующий. Определяют величины $\psi_{к,ф}$; $\psi_{м,ф}$; $\psi_{к,м}$; $\psi_{к,м}^{\prime}$ и при определенной температуре материала T_m из уравнений (39) и (40) находят T_g (при определенной температуре кладки) или T_k (при определенной температуре газов). Далее определяют: $Q_{\varepsilon,м}^{\varepsilon}$; $Q_{\varepsilon,м}^{\alpha}$; $Q_{к,м}^{\varepsilon}$ и $Q_{к}^{\text{ок}}$.

В случае полного заполнения факелом пламенного пространства, $a = 1$; $\psi_{к,ф} = \psi_{м,ф} = 1$.

Методика расчета теплообмена в пламенном пространстве с учетом факельного характера горения и отраженных потоков тепла, а также различия температур отдельных поверхностей кладки развита М. А. Глинковым.

Большие трудности в расчете теплообмена представляет учет прозрачности материала. Некоторые положения такого расчета разработаны Д. Б. Гинзбургом применительно к стекловаренным печам.

2. НАГРЕВАНИЕ И ОХЛАЖДЕНИЕ ТЕЛ

При расчете печей и сушилок требуется определять длительность прогрева или охлаждения тел, подвергающихся тепловой обработке. Эти расчеты позволяют также установить правильность условий, заданных для планетного пространства, т. е. возможность восприятия нагреваемыми телами количества тепла, которое может быть отдано в планетном пространстве.

Нагрев и охлаждение тел характеризуются нестационарным тепловым потоком. Расчет его возможен в ограниченном количестве случаев, и обычно стремятся свести расчет к этим случаям с помощью ряда упрощений.

Для расчета прогрева тел используют дифференциальное уравнение теплопроводности, решаемое в случае одномерного теплового потока. Точные решения имеются для тел правильной формы, обладающих постоянными физическими свойствами.

Уравнение теплопроводности при проникновении тепла в одном направлении:

$$\frac{\partial t}{\partial z} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = \frac{\lambda}{c\gamma} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \quad (41)$$

где: $\frac{\partial t}{\partial z}$ — скорость изменения температуры элементарного объема:

a — коэффициент температуропроводности нагреваемого тела;

$$a = \frac{\lambda}{c\gamma} \text{ м}^2/\text{час};$$

λ — коэффициент теплопроводности в кал/м час град.;

c — удельная теплоемкость в кал/кг град.;

γ — объемный вес в кг/м³.

Для стационарного одномерного потока:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0. \quad (42)$$

Различают три периода нагрева тела: 1) неупорядоченного процесса, 2) упорядоченного процесса (регулярный режим) и 3) стационарного процесса. В первый период скорость изменения температуры в отдельных точках различна и сильно зависит от начального состояния. Во второй период влияние начальных неравномерностей сглаживается и скорость изменения температуры становится постоянной. В третий период распределение температур во времени постоянно или наступает тепловое равновесие.

Решение задач нестационарной теплопроводности при одномерном тепловом потоке производится, в основном, путем использования трех критериев подобия:

$$\frac{aS}{\lambda_m} = \text{Bi} \text{ (критерий Био)}, \quad (43)$$

$$\frac{az}{S^2} = \text{Fo} \text{ (критерий Фурье)}, \quad (44)$$

$$\frac{x}{S} = \text{L} \text{ (критерий геометрического подобия)}, \quad (45)$$

где: α — коэффициент теплоотдачи от газов к материалу в кал/м² час град.;

λ_m — коэффициент теплопроводности материала в кал/м час град.;

S — размер тела (толщина, диаметр) в м;

a — коэффициент температуропроводности в м²/час;

x — расстояние рассматриваемого сечения от начального в м;

z — время нагрева в час.

Искомая функция может быть представлена в виде безразмерных температур или количества тепла:

$$\frac{t}{t'} = \Phi(\text{Bi}, \text{Fo}, \text{L}). \quad (46)$$

Эти же функции могут быть использованы для решения задач, связанных с диффузионными процессами.

Если поверхность плиты бесконечно большой толщины, имеющей в начальный момент равномерную температуру $t_{\text{нач}}$, внезапно принимающую температуру $t_{\text{нов}}$, то прогресс ее можно определить по уравнениям:

$$t = t_{\text{нов}} + (t_{\text{нач}} - t_{\text{нов}}) j_1 \left(\frac{x}{2\sqrt{az}} \right); \quad (47)$$

$$Q = \lambda (t_{\text{нов}} - t_{\text{нач}}) \frac{e^{-\frac{x^2}{4az}}}{\sqrt{a\pi z}} \text{ кал/м}^2 \text{ час}; \quad (48)$$

$$Q' = 2\lambda (t_{\text{нов}} - t_{\text{нач}}) \sqrt{\frac{x}{a\pi z}} \text{ кал/м}^2, \quad (49)$$

где: t — температура поверхности на расстоянии x по прошествии z часов в град.;

Q — количество тепла, проходящее через поверхность на расстоянии x по прошествии z часов, в кал/м²;

Q' — количество тепла, проходящее через поверхность $x=0$ за z часов, в кал/м²;

e — основание натуральных логарифмов, равное 2,718.

Уравнения, характеризующие нагревание или охлаждение стенок бесконечно большой толщины, верны и для стенки конеч-

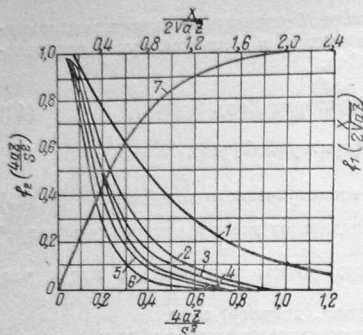


Рис. 16. Значение функций f_1 и f_2 : функция f_1 : 1 — плита; 2 — квадратный брус бесконечной длины; 3 — цилиндр бесконечной длины; 4 — куб; 5 — цилиндр с длиной, равной диаметру; 6 — шар; 7 — функция f_2 .

Уравнение дает возможность определить t или z . Значение функций f_1 и f_2 приведено на рис. 16.

По графикам также определяют изменение температуры поверхности и середины (или центра) и количество полученного тепла для плиты, цилиндра и шара, имевших первоначально одну равномерную температуру и внесенных в среду с другой неизменной температурой. На графиках даются значения функций критериев Fo и Vi по следующим уравнениям:

$$t_{\text{пов}} = t_e + (t_{\text{нач}} - t_e) f_1 \left(\frac{4az}{S_z}, \frac{aS}{2\lambda} \right); \quad (51)$$

$$t_{\text{ср}} = t_e + (t_{\text{нач}} - t_e) f_2 \left(\frac{4az}{S_z}, \frac{aS}{2\lambda} \right); \quad (52)$$

$$Q = Sc \gamma (t_{\text{нач}} - t_e) f_6 \left(\frac{4az}{S_z}, \frac{aS}{2\lambda} \right) \text{ кал/м}^2 \text{ час.} \quad (53)$$

Приведенные уравнения решаются с помощью номограмм Д. В. Бударина и Б. А. Красовского.

Номограммы дают возможность определить значения функций не только для поверхности центра и в среднем для массы данного тела, но и для точки на любом расстоянии от поверхности.

Для использования графиков необходимо знать значение коэффициента теплоотдачи излучением и конвекцией от внешней среды к поверхности тела. Величина этого коэффициента зависит от температуры и степени черноты факела, значения конвективной слагающей теплоотдачи, расположения и размеров факела и кладки и т. д. Принимаемые для расчета значения коэффициента теплоотдачи должны быть обоснованы данными опыта и отнесены

той толщине до того момента от начала нагревания, пока

$$\frac{S}{2\sqrt{az}} \geq 0,6.$$

При меньших значениях характеристического фактора устанавливается стационарное состояние.

Изменение температуры в середине пластины, шара, цилиндра и квадратного бруса при внезапном изменении температуры их поверхности определяют по уравнению:

$$t = t_{\text{нов}} + (t_{\text{нач}} - t_{\text{нов}}) f_2 \left(\frac{4az}{S_z} \right). \quad (50)$$

к расчетным температурам поверхности нагреваемого тела и нагревающей среды (газов или кладки).

Для уточнения возможной разности температур факела ($T_{\text{ф}}$) и нагреваемой поверхности ($T_{\text{м}}$) может быть использовано выражение для их эффективной разности, имеющее по В. Н. Тимофееву следующий вид:

$$T_{\text{ф}}^4 - T_{\text{м}}^4 = \sqrt{(T_{\text{г}}^4 - T_{\text{м}}^4)(T_{\text{г}}^4 - T_{\text{м}}^4)}, \quad (54)$$

где: $T_{\text{г}}$ — калориметрическая температура топлива в °К; $T_{\text{м}}$ и $T_{\text{м}}^*$ — начальная и конечная температуры поверхности материала в °К;

$T_{\text{г}}$ — температура газов на выходе из печи в °К.

Рассмотренные методы расчета прогрева тел не учитывают изменений физических свойств тел в стадии нагрева, что в известных случаях может быть компенсировано принятием в расчете средних значений физических констант. Однако в ряде случаев это невозможно и приходится прибегать к расчету прогрева тел по методу конечных разностей.

По этому методу в дифференциальном уравнении теплопередачи теплопроводностью [формула (41)] бесконечно малые приращения dt , dx и dz заменяют конечными приращениями Δt , Δx и Δz .

Стена делится на n слоев толщиной Δx , причем расчетный промежуток времени принимают из соотношения:

$$\Delta z = \frac{(\Delta x)^2}{2a} \text{ часов.} \quad (55)$$

При этом температура поверхности каждого слоя (кроме наружных поверхностей) равна полусумме температур двух смежных поверхностей за предыдущий промежуток времени. Если n порядковый номер отрезков времени, а m — слоев и t температура, то:

$$t_{(n+1)\Delta x, m\Delta z} = \frac{1}{2} [t_{n\Delta x, (m+1)\Delta z} + t_{n\Delta x, (m-1)\Delta z}]. \quad (56)$$

Температура внутренней поверхности задается или определяется в зависимости от температуры газов (θ_2), коэффициента теплоотдачи от газов к стенке (α), коэффициента теплопроводности (λ) и толщины (Δx) слоя стенки по формуле:

$$t_{n\Delta x, 0\Delta z} = \frac{a\Delta x \theta_2 + \lambda t_{n\Delta x, 1\Delta z}}{\lambda + a\Delta x} * \quad (57)$$

При расчете прогрева многослойной стенки один слой принимается за основной, а расчетная толщина, например Δx_2 , для другого слоя принимается из соотношения:

$$\Delta x_2 = \Delta x_1 \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} M, \quad (58)$$

* Если определяется температура наружной поверхности, то берется температура предпоследней поверхности.

где a_2 — коэффициент температуропроводности материала другого слоя.

Прогрев стенки определяется как и ранее по уравнению (56). Однако оно правильно до момента повышения температуры в месте соприкосновения слоев из различного материала. Начиная с этого времени температура на границе определяется по уравнению:

$$\begin{aligned} t_n \Delta z_1 + m \Delta x_1 &= t_n \Delta z_2 + o \Delta x_2 = \\ &= \frac{r_1 t_{n \Delta z_1} \Delta x_2 + r_2 t_{n \Delta z_2} (m-1) \Delta x_1}{r_1 + r_2}, \end{aligned} \quad (59)$$

где r_1 и r_2 — термические сопротивления слоев Δx_1 и Δx_2 из различных материалов в час град. м²/кал.

Возможно определять температуры граничного слоя и по другим формулам.

Методика графического расчета прогрева стен с использованием конечных разностей разработана В. Д. Моро и Л. Г. Вейнрубом для однородной и многослойной стенки. Температуру в определенном сечении стены определяют с помощью простого графического приема. Прямая, соединяющая две смежные к этому сечению температурные точки за предыдущий промежуток времени, дает в пересечении с вертикалью, соответствующей рассматриваемому сечению, температуру его в данный момент времени. Температура стенки в месте соприкосновения слоев из различного материала также определяется графически взамен использования уравнения (59).

При графическом расчете многослойной стенки, состоящей из отдельных однородных слоев-стенок, одна стенка толщиной δ_1 принимается за основную. Другая стенка толщиной, например, δ_2 заменяется эквивалентной — толщиной $\delta_2^{эке}$. Эквивалентная в тепловом отношении стенка должна быть подобна заменяемой, и теплопроводность ее равна теплопроводности основного слоя. При этом:

$$\delta_2^{эке} = \delta_2 \frac{\lambda_1}{\lambda_2}. \quad (60)$$

Если основная стенка делится на слои толщиной Δx , то эквивалентная делится на части толщиной:

$$\Delta x_{эке} = \Delta x \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}}. \quad (61)$$

В этом случае температурное поле в эквивалентной стенке рассчитывают так же, как и для однородной стенки. Получив кривую температур в эквивалентной стенке, переносят точки температурной кривой в сходственные точки действительной стенки.

Последовательность решения задачи по прогреву тел методом конечных разностей позволяет в стадии решения учитывать изменения свойств и размеров нагреваемых тел.

Имеются экспериментальные методы решения задач по нестационарной теплопроводности, которые можно применять для тел любой формы и при любых краевых условиях. Метод В. С. Лукьянова основан на аналогии между явлениями распространения тепла и ламинарного движения жидкости (метод гидротепловой аналогии). Метод Л. И. Гутенмахера основан на аналогии процессов, протекающих при тепловых и электрических явлениях (метод электротепловой аналогии).

3. ТЕПЛООБМЕН В СЛОЕ

Расчет теплообмена в слое имеет существенное значение при использовании шахтных печей (сушилок, обжигательных печей, газогенераторов). На теплообмен в слое влияют теплоотдача от газов к кускам и термическое сопротивление кусков.

По В. Н. Тимофееву, значение коэффициента теплоотдачи в слое от газов к поверхности кусков определяется по рис. 17 в зависимости от значения критериев:

$$Re = \frac{w \gamma d}{g \mu} \quad (62)$$

и

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda_g} \quad (63)$$

где: w — скорость газов, отнесенная к полному сечению слоя в м/сек.;

d — размер кусков в м;

μ — вязкость газов в кг сек/м²;

γ — удельный вес газа в кг/м³;

α — коэффициент теплоотдачи от газа к поверхности кусков в кал/м² час град.;

λ_g — коэффициент теплопроводности газа в кал/м час град.;

g — ускорение силы тяжести (9,81 м/сек.²).

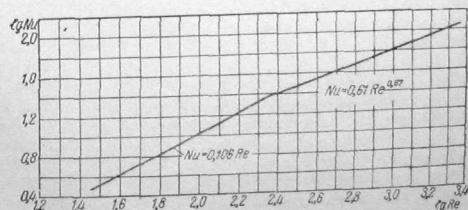


Рис. 17. Кривая теплоотдачи в слое.

При $Re < 200$

$$Nu = 0,106 Re \quad (64)$$

$$\alpha = 0,106 \frac{\lambda_1 (w\gamma)}{g r^2}; \quad (65)$$

при $Re > 200$

$$Nu = 0,61 Re^{0,57} \quad (66)$$

$$\alpha = 0,61 \frac{\lambda_1 (w\gamma)^{0,57}}{(g r)^{0,57} d^{0,43}} \quad (67)$$

По З. Ф. Чуханову, тепловым сопротивлением куска можно пренебречь при следующих условиях:

$$\frac{1}{Bi} = \frac{\lambda_m}{\alpha r} > 1,0 - 1,5,$$

где: λ_m — теплопроводность материала куска в кал/м час град,
 r — радиус куска в м.

В этом случае для расчета прогрева куска при постоянной температуре газов могут быть использованы номограммы Будрина и Красовского. При переменной температуре газов расчет ведется по формулам теплообменников (стр. 150) и рис. 46.

Если нельзя пренебречь тепловым сопротивлением куска, теплообменник разделяют на участки, в пределах которых температура газов принимается постоянной и учитывают тепловой баланс каждого участка. Для расчета используют графики Будрина и Красовского.

Глава четвертая

ДИФфуЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ

Процессы, протекающие в печах и сушильках, например, горение газа, выделение влаги из материала, растворение зерен кремнезема в расплаве при получении стекломассы, в значительной мере зависят от диффузионных процессов.

Химические процессы на поверхности соприкосновения двух фаз (подвод к поверхности реагирующих веществ и отвод от нее продуктов реакции) сопровождаются также диффузией. Наблюдаемая скорость процесса зависит от скорости собственно химической реакции и от скорости диффузии.

1. СКОРОСТЬ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО ГЕТЕРОГЕННОГО ПРОЦЕССА

Скорость химической реакции очень быстро растет с температурой. Поэтому область температур, в которой скорость химической реакции и диффузии одного порядка, очень мала. Для процессов, связанных с горением и газификацией выше $700 - 900^\circ$ — при не очень малых давлениях или очень больших скоростях — скорость суммарного процесса определяется лишь диффузионными и теплотехническими факторами. Это так называемая диффузионная область параметров, характеризующих процесс (рис. 18).

При низких температурах (или очень малых давлениях, или же очень высоких скоростях газового потока) суммарный процесс ограничивается скоростью собственно химической реакции, а скорость диффузии значительно больше. Скорость суммарного процесса определяется кинетикой реакции, и эта область называется кинетической.

В диффузионной области скорость процесса не зависит от механизма химической реакции и определяется скоростью газового потока; влияние температуры невелико. Все реакции идут по первому порядку по концентрации реагирующего газа при постоянном общем давлении и по нулевому порядку по давлению при постоянных концентрации реагирующего газа и массовой скорости.

В кинетической области скорость реакции сильно возрастает с температурой. Эта зависимость обычно удовлетворяет закону Аррениуса:

$$k = ze^{\frac{-E}{RT}}, \quad (4)$$

где: k — коэффициент скорости реакции,
 T — абсолютная температура в °K,
 R — газовая постоянная;

E и z — постоянные величины, характерные для данной химической реакции. Величину E называют энергией активации, величину z — предэкспоненциальным множителем. Энергия активации представляет собой ту энергию, которой должна обладать молекула, чтобы прореагировать;

e — основание натуральных логарифмов.

В кинетической области скорость газового потока не влияет на процесс. Зависимость от концентрации реагирующего вещества может быть различной.

В кинетической области скорость реакции пропорциональна свободной поверхности реагирующего твердого тела, тогда как в диффузионной области скорость процесса сложным образом зависит от геометрической конфигурации системы.

Для упрощения принимаем, что скорость химической реакции пропорциональна концентрациям реагирующих веществ в данный момент времени. Если в системе одновременно протекает несколько реакций, то каждая из них протекает независимо друг от друга. Полное изменение системы является суммой этих независимых изменений. Поэтому скорость обратной химической реакции есть разность между скоростью образования вещества по прямой реакции и скоростью исчезновения его по обратной реакции.

Если активность вещества B пропорциональна его концентрации, то скорость обратной химической реакции $A + B \rightleftharpoons C + D$, т. е. количество вещества A , прореагировавшего в единицу времени, выражается уравнением:

$$-\frac{\partial M_A}{\partial z} = K_1 a_A (C_B - C_B^{рае}), \quad (2)$$

где: a_A — активность вещества A ,

C_B — концентрация вещества B ,

$C_B^{рае}$ — концентрация вещества B в потоке жидкости или газа равновесная с поверхностью тела,

K_1 — коэффициент скорости реакции.

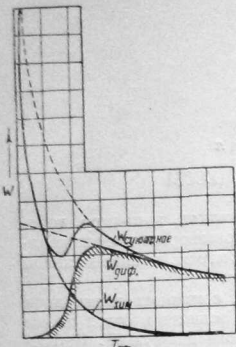


Рис. 18. Зависимость сопротивлений химической реакции и диффузии от температуры.

Если концентрация вещества A при реакции остается постоянной, скорость химической реакции:

$$-\frac{\partial M_A}{\partial z} = \beta_{хим} (C_B - C_B^{рае}), \quad (3)$$

где $\beta_{хим}$ — коэффициент скорости химической реакции, зависящий от величины энергии активации (E) данной химической реакции, от температуры и от эмпирического коэффициента (K) скорости реакции:

$$\beta_{хим} = K \sqrt{T} e^{\frac{-E}{1,99T}} a_A, \quad (4)$$

следовательно:

$$-\frac{\partial M}{\partial z} = K \sqrt{T} e^{\frac{-E}{1,99T}} a_A (C_B - C_B^{рае}). \quad (5)$$

При установившемся стационарном процессе равенство количеств вещества, поступившего на поверхность путем диффузии и прореагировавшего на поверхности, дает:

$$G = \beta_{хим} (C^s - C^{рае}) Fz = \beta_{физ} (C^0 - C^s) Fz, \quad (6)$$

где: $\beta_{хим}$ — коэффициент скорости химической реакции, в см/сек.;

C^s — концентрация реагирующего вещества в слое жидкости или газа около поверхности тела в г/см³;

F — поверхность реакции тела в см²;

z — время действия в сек.;

$\beta_{физ}$ — скорость перехода вещества путем диффузии в см/сек.;

C^0 — концентрация диффундирующего вещества в основной массе потока в г/см³;

$C^{рае}$ — концентрация реагирующего вещества в потоке жидкости или газа, равновесная с поверхностью тела, в г/см³.

Отсюда:

$$C^s = \frac{\beta_{физ} C^0 + \beta_{хим} C^{рае}}{\beta_{физ} + \beta_{хим}}; \quad (7)$$

$$G = \frac{\beta_{хим} \beta_{физ} (C^0 - C^{рае})}{\beta_{физ} + \beta_{хим}} Fz = \frac{C^0 - C^{рае}}{\frac{1}{\beta_{хим}} + \frac{1}{\beta_{физ}}} Fz = \beta_{общ} (C^0 - C^{рае}) Fz, \quad (8)$$

где $\beta_{общ} = \frac{1}{\frac{1}{\beta_{хим}} + \frac{1}{\beta_{физ}}}$ — скорость физико-химического процесса

между потоком газа или жидкости и поверхностью тела, в см/сек.

2. СКОРОСТЬ ДИФФУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Процессы передачи тепла и вещества подобны друг другу. Передаче тепла молекулярной теплопроводностью соответствует молекулярная диффузия, передаче тепла конвекцией — конвективная диффузия. Передача тепла излучением не имеет аналогии в процессах передачи вещества.

Скорость диффузии определяется законом Фика:

$$\frac{dc}{dz} = D \frac{d^2c}{dy^2}, \quad (9)$$

где: $\frac{dc}{dz}$ — скорость изменения концентрации (плотности) вещества со временем;

$\frac{dc}{dy}$ — градиент плотности вещества по направлению y

или
$$\frac{dM}{dz} = -D \frac{dc}{dy} \text{ г/см}^2 \text{ сек.}, \quad (10)$$

где dM — количество продиффундировавшего вещества за время dz .

Скорость транспорта вещества поперек турбулентного потока равна:

$$\frac{dM}{dz} = -D_m \frac{dc}{dy} \text{ г/см}^2 \text{ сек.}, \quad (11)$$

где: D_m — коэффициент турбулентной диффузии в $\text{см}^2/\text{сек.}$;

$\frac{dc}{dy}$ — градиент концентрации вещества поперек потока в г/см^4 .

При турбулентной диффузии в турбулентном слое потока градиент изменения концентрации $\frac{dc}{dy}$ небольшой, а коэффициент диффузии D_m имеет большое числовое значение. При молекулярной диффузии условия являются обратными. Коэффициент молекулярной диффузии газов в 1,4 раза больше молекулярной кинематической вязкости:

$$D = 1,4\nu \text{ см}^2/\text{сек.} \quad (12)$$

Коэффициент турбулентной диффузии для любого газа в потоке любого газа:

$$D_m = 0,29 \cdot 10^{-6} \frac{w d}{\mu} \text{ см}^2/\text{сек.}, \quad (13)$$

где: w — средняя скорость газового потока в см/сек. ;

d — гидравлический диаметр потока в см , равный отношению учетверенной площади поперечного потока к периметру потока;

μ — молекулярная вязкость газового потока в г/см сек.

Коэффициент молекулярной диффузии тем больше, чем больше молекулярная вязкость газа, т. е. он увеличивается с температурой. Коэффициент турбулентной диффузии возрастает с умень-

шением молекулярной вязкости газового потока, т. е. уменьшается с повышением температуры и не зависит от состава диффундирующего вещества.

Приближенно:

$$D_m = 0,01 \sqrt{\xi} w d, \quad (14)$$

где ξ — коэффициент потери напора на трение в формуле (43) главы II.

В чисто турбулентном потоке (вдали от ограничивающих поток стенок) коэффициент диффузии пропорционален скорости потока (увеличение скорости флуктуации частиц поперек потока) и его гидравлическому диаметру (увеличение пробега частиц поперек турбулентного потока).

В обычном смешанном (ламинарно-турбулентном) потоке коэффициент диффузии несколько зависит от величины числа Re .

Количество вещества, подведенного к поверхности тела из потока жидкости или газа путем диффузии (молекулярной и турбулентной), равно:

$$G = \beta_{\text{диф}} (C^o - C^s) F z, \quad (15)$$

где: $\beta_{\text{диф}}$ — скорость перехода вещества путем диффузии в см/сек. ,

C^o — концентрация диффундирующего вещества в основной массе потока в г/см^3 ;

C^s — концентрация диффундирующего вещества около поверхности тела в г/см^3 .

Значения $\beta_{\text{диф}}$ можно определить по закону подобия явлений диффузии, теплопередачи конвекцией (α_k) и внутреннего трения.

Для газов с теплоемкостью c_p и удельным весом γ

$$\beta_{\text{диф}} = \frac{\alpha_k}{c_p \gamma}. \quad (16)$$

Из пористых тел вещество испаряется не только на внешней поверхности, но и в глубине материала, т. е. в пределах некоторой зоны, с увеличенной поверхностью, теплопередача же конвекцией происходит лишь с внешней поверхности тела.

Следовательно, диффузия вещества в газовый поток из пористого тела происходит быстрее, чем это следует из формулы (16).

Коэффициенты теплопередачи конвекцией для различных потоков в настоящее время хорошо известны, и по законам подобия может быть определена скорость диффузии в газовом потоке.

Зависимость между теплопередачей конвекцией и потерей напора на трение позволяет установить связь между β и ξ .

Для турбулентного газового потока

$$\beta_{\text{диф}} = \frac{0,125 \xi w}{1 - 3 \sqrt{0,125 \xi}}. \quad (17)$$

Таким образом, скорость диффузии вещества в турбулентном потоке пропорциональна скорости движения потока около реагирующей поверхности и коэффициенту потери напора.

Для стабилизированного ламинарного потока $\xi = \frac{64}{Re}$ и получаем для газового потока:

$$\beta_{diff} = \frac{8}{d - 8,5 \sqrt{\frac{d\nu}{w}}} \quad (18)$$

Таким образом, скорость диффузии вещества в турбулентном потоке пропорциональна скорости потока но почти не зависит от диаметра его. В ламинарном потоке скорость диффузии уменьшается с увеличением диаметра (или диаметра частицы твердого тела при обтекании ее), но не зависит от скорости потока.

При температурах выше 900° горение углерода является чисто диффузионным процессом; продолжительность горения угольной частицы в турбулентном потоке примерно обратно пропорциональна скорости потока в степени 0,8 и прямо пропорциональна диаметру частичек в первой степени, а в ламинарном потоке пропорциональна диаметру частички в степени 1,8 и не зависит от скорости потока.

При решении вопросов, связанных с физико-химическими процессами, возникает необходимость рассчитывать нестационарные диффузионные процессы, т. е. такие, в которых концентрация (плотность) вещества изменяется со временем.

Для решения задач по динамике диффузионных процессов могут быть использованы графики Будрина и Красовского (см. главу III), разработанные применительно к задачам по нестационарному тепловому потоку и применимые в данном случае вследствие подобия явлений теплопередачи и диффузии.

Если в процессе внутреннего диффузия идет со значительно большей скоростью, чем внешняя, то концентрация вещества внутри и на поверхности тела получается практически одинаковой. При прочих равных условиях диффузия с поверхности идет с одинаковой скоростью для крупных и мелких тел. В этом случае продолжительность процесса для получения одинаковой степени обработки будет пропорциональна первой степени условной толщины S предмета (отношения его объема к омываемой потоком поверхности). Интенсивность диффузии с поверхности пропорциональна скорости потока. Для ускорения протекания таких процессов (удаления влаги с открытой поверхности, сушки изделий в период постоянной скорости сушки) следует увеличивать поверхность соприкосновения тел с потоком и скорость движения потока около поверхности.

Если внешняя диффузия от поверхности идет во много раз быстрее внутренней, то концентрация вещества на поверхности сразу становится практически равновесной с потоком газа или жидкости. При постоянных параметрах потока концентрация вещества на поверхности, мгновенно изменившись, остается неизменной в течение всего процесса. Подобие процесса определяется

исключительно критерием $\frac{4Dz}{S^2}$, т. е. для подобия процесса требуется, чтобы $\frac{4Dz}{S^2} = idem$. Продолжительность таких процессов z обратно пропорциональна коэффициенту внутренней диффузии D и прямо пропорциональна квадрату толщины S обрабатываемых предметов. Скорость движения потока и поверхности обрабатываемых предметов не влияет. Таким процессом является сушка изделий в третьем периоде.

Если скорость внешней диффузии соизмерима со скоростью внутренней диффузии, продолжительность процесса при одинаковых прочих условиях пропорциональна условной толщине предметов в степени n , лежащей в пределах 1—2, и скорости потока в степени $2-n$.

3. СМЕШЕНИЕ ГАЗОВЫХ СТРУЙ И ГОРЕНИЕ ГАЗА

Диффузия вещества и передача тепла в газовой струе происходят вследствие разности температур или концентраций, обуславливающих перемещение частиц газа. Отсюда возникает представление о температурно-скоростной и материальной аналогии при турбулентной диффузии в струе.

Степень незавершенности теплопередачи и диффузии по оси струи выражается уравнением:

$$\frac{t_1 - t_{окр}}{t_0 - t_{окр}} = \frac{c_1 - c_{окр}}{c_0 - c_{окр}} \approx \frac{5d}{x}, \quad (19)$$

где: t_0 и c_0 — соответственно температура и концентрация диффундирующего вещества в струе сопла;

t_1 и c_1 — то же по оси струи на расстоянии x от сопла (рис. 7);

$t_{окр}$ и $c_{окр}$ — то же в окружающей среде.

Таким образом, не только размеры сечения и скорость частиц в струе, но и температуры и концентрации вещества на оси струи зависят от величины $\frac{x}{d}$. Последние два параметра не зависят от начальной скорости газа. Объясняется это следующим образом.

Турбулентность потока в каждой точке определяется тремя факторами: средней скоростью пульсаций, числом пульсаций и длиной пробега молекул. Эти факторы являются функцией от длины струи в безразмерных координатах $\left(\frac{x}{d}\right)$. Эта длина, характеризующая перемешивание потока, не зависит от абсолютного значения скорости истечения из сопла w_0 и диаметра сопла d . Хотя при повышении w_0 возрастает w_m (средняя скорость в сечении факела) и интенсивность турбулентного перемешивания, но во столько же раз уменьшается время прохождения пути x . При возрастании d возрастают d_m (средний диаметр сечения потока) и интенсивность турбулентного перемешивания, но одновременно уменьшается длительность пребывания частиц потока

на пути x (уменьшение тормозящего влияния среды и увеличение ω_m).

Абсолютная длина струи, в которой перемешиваются неоднородные потоки, не зависит от ω_0 и увеличивается пропорционально d (калибру) сопла.

Таким образом, распределение температур и концентрации перемешиваемого вещества является функцией величины $\frac{x}{d}$.

При температурах выше 700° химической реакции горения газа имеют большую скорость, и горение газа лимитируется условиями смешения газа с кислородом воздуха. Горение газа и летучих веществ в топках и газовом пространстве печей является чисто диффузионным процессом. В топочном или печном пространстве уже на небольшом расстоянии от стенок поток газов является чисто турбулентным. В этом потоке происходит смешение газа и воздуха и горение. Коэффициент турбулентной диффузии:

$$D_m = \frac{0,29 \cdot 10^{-6}}{\mu} \cdot \omega d \text{ см}^2/\text{сек.}, \quad (20)$$

где: ω — средняя скорость газового потока, в см/сек.;

d — диаметр потока в см;

μ — вязкость газов в пуазах $\left(\frac{\text{г}}{\text{см сек.}}\right)$.

Критерий подобия диффузии в турбулентном потоке $\frac{4D_m z}{S^2}$.

Время смешения $z = \frac{l}{w}$ сек., где l — длина от места начала смешения в см. Одна и та же степень выгорания получается при $\frac{4D_m z}{S^2} = \text{idem}$, т. е.

$$\frac{4D_m z}{S^2} = \frac{4 \cdot 0,29 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\omega d}{\mu} \cdot \frac{l}{w}}{S^2} = \frac{4 \cdot 0,29 \cdot 10^{-6} d l}{\mu S^2} = \text{idem}, \quad (21)$$

где: d — гидравлический диаметр всего потока газов, т. е. гидравлический диаметр топочного пространства в см;

S — толщина или диаметр одной струи газа и воздуха в см.

Критерий $\frac{4 \cdot 0,29 \cdot 10^{-6} d l}{\mu S^2}$ — критерий перемешивания газов в турбулентном потоке. Произведение dl — площадь, равная произведению гидравлического диаметра всего газового потока на длину участка смешения (от места начала смешения). Из этого критерия можно получить отношение $\frac{dl}{S^2}$, т. е. во сколько раз площадь dl больше сечения отдельной газовой струи.

Если поперечные размеры точки и количества газа и воздуха (V см³/сек.) неизменны, но меняется диаметр струй, получаем $l = m S^2$ и

$$\omega = \frac{V}{\frac{\pi S^2}{4} n} = \text{const}; n S^2 = \text{const}; l = \frac{k}{n},$$

где: n — число струй газа, m и k — постоянные.

Длина участка горения обратно пропорциональна количеству струй газа. Длина области горения уменьшается при раздроблении струй.

Если все условия неизменны, но пропорционально изменяются все поперечные размеры и горелок и точки, то обычно диаметр всего потока пропорционален калибру струй s , т. е. $d = ks$. Отсюда $l = ms$, т. е. длина смешения пропорциональна калибру горелки.

Если при прочих неизменных условиях изменяется количество газов, поступающих в точку или горелку (обязательно сохранение соотношения между количествами газа и воздуха), длина пути смешения является постоянной. При увеличении количества газа уменьшается длительность смешения, но во столько же раз возрастает скорость диффузии в турбулентном потоке. Экспериментально это правило впервые подтверждено академиком Доброхотовым Н. Н. и Соколовым М. С.

Исследования позволяют заключить, что для процессов диффузии и горения длина пути газов в камере смешения точки отнюдь не взаимозаменяема с поперечными размерами камеры. Поперечные размеры точки определяются из условий воспламенения газа или мазута, механического уноса пыли, теплопередачи лучеиспусканием и пр., а длина точки по ходу газа определяется из условий завершенности процесса смешения в зависимости от калибра газовых струй. Иногда точка совмещается с рабочей камерой печи, т. е. с камерой, где происходит теплопередача от продуктов горения к теплопоглощающим поверхностям.

Теплонапряжение рабочей камеры, отнесенное к 1 м² теплопринимающей поверхности, т. е. потенциальное тепло топлива, сжигаемого в час на 1 м² поверхности материала, является вводимым рациональным критерием работы. От него зависит производительность тепловой установки, температура кладки и факела. Отношение теплового напряжения к единице объема камеры является неправильным.

В одном и том же топочном пространстве можно сжечь при турбулентном движении любое количество газообразного топлива, если раздробить струи газа и воздуха и подавать в топочное пространство это количество газа и воздуха при постоянном соотношении между воздухом и газом, обеспечив только воспламенение горючей смеси. Турбулентное движение является обменным движением. Следовательно, можно получить любое теплонапряжение объема топочного пространства, и обычно, вводимое пространство имеет обоснования. То же относится к понятию о времени пребывания газов в пламенном пространстве.

Глава пятая ТОПЛИВО И ЕГО СЖИГАНИЕ

1. ВИДЫ ТОПЛИВА

В спикатной промышленности применяется большинство видов твердого, жидкого и газообразного топлива. Если топливо используют непосредственно для технологических процессов его называют технологическим. Выбор вида топлива обуславливается техно-экономическими соображениями. Особое внимание необходимо придавать использованию местных видов топлива.

Чтобы лучше использовать топливо, его подготавливают — измельчают, газифицируют, брикетировуют, очищают, обогащают и т. д.

Применяющиеся в промышленности жидкие топлива, а также угли и коксовый остаток топлив, содержат углерод и другие элементы, образующие сложные органические соединения. Угли и кокс представляют собой кристаллические образования, подобные графиту, но тонкодисперсные, состоящие из остовов решеток, легко проникаемых для газовых молекул. Ячеистая структура, крупные поры и тонкая дисперсность увеличивают их активность.

Газообразные топлива, а также газы и пары, получающиеся при разложении жидких и твердых топлив, содержат CO , H_2 , углеводороды и кислородные производные углеводородов.

2. ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ ПРИ ГОРЕНИИ ТОПЛИВА

При нагревании теплоустойчивые топлива (углерод, водород, окись углерода) сохраняют неизменной структуру молекулы. Теплоустойчивые топлива распадаются при нагревании. Топлива, содержащие в органической массе C , H и O , обычно теплоустойчивы.

При нагревании до сравнительно невысоких температур твердое топливо подвергается сухой перегонке.

Горение жидкого и газообразного топлива сопровождается пирогенетическим разложением и окислением как исходного топлива, так и продуктов его разложения. Распад и окисление протекают ступенями. Окислению подвержены прежде всего соединения, содержащие кислород. В результате получаются наиболее теплоустойчивые продукты: C , CO и H_2 , которые окисляются в CO_2 и H_2O . Эту конечную стадию можно рассматривать как процесс собственно горения.

При низких температурах скорость окисления горючих веществ мала. Нагревание смеси топлива и воздуха увеличивает скорость реакции, и при температуре воспламенения скорость их настолько возрастает, что медленное окисление переходит в быстрый процесс горения.

Быстрое выделение тепла приводит к резкому увеличению теплового потока, нагревающего горючее. При этом в случае газообразного топлива сильный диффузионный поток разбавляет газ продуктами горения и, следовательно, происходит горение разбавленной горючей смеси. Распределение температур и концентраций в пламени зависит от диффузии газов и их теплопроводности.

Горючая смесь, нагретая до температуры воспламенения, в дальнейшем разогревается сама; при этом скорость реакции растет, и горение может перейти во взрыв. Смеси горючих газов воспламеняются, если их составляющие находятся в определенном соотношении с воздухом. Соответственно максимальному и минимальному пределам содержания горючих газов в смеси, переход через которые делает смесь невоспламеняющейся, различают высший и низший пределы воспламеняемости. Повышение температуры смеси расширяет пределы воспламеняемости. Выше 700° горючие смеси воспламеняются при любом соотношении газа и воздуха.

Сжигать топливо можно либо в самостоятельных топках, либо в рабочем пространстве печи. В последнем случае устраняются потери тепла тошкой в окружающую среду и повышается достижимая температура горения. Сжиганию твердого и пылевидного топлива в рабочем пространстве препятствует загрязнение нагреваемых материалов золой и пылью. Поэтому твердое топливо часто сжигают в топках. В низкотемпературных печах газ и жидкое топливо также часто сжигают в специальных камерах-топках, снижая температуру продуктов горения путем разбавления их воздухом.

3. ТЕМПЕРАТУРА ГОРЕНИЯ

Различают следующие температуры: калориметрическую, теоретическую и практическую. Под калориметрической (T_k) понимают температуру, достигаемую при затрате всего тепла на нагрев продуктов горения и полное сгорание. Теоретической (T_m) называют температуру, достигаемую в тех же условиях, но с учетом диссоциации продуктов горения. Под практической (T_n) понимают температуру, достигаемую в практических условиях, т. е. при наличии теплоотдачи от факела.

Для грубого определения практически достигаемой температуры используют значения пирометрического κ . п. д. — η_k , под которым понимают отношение практически достигаемой температуры к калориметрической:

$$T_n = \eta_k \cdot T_k. \quad (1)$$

Пирометрический к. п. д. η_k имеет следующие значения; стекловаренные печи непрерывного действия—0,7—0,75; вращающиеся печи для обжига портландцементного клинкера—0,68—0,75;

шахтные перемыштные печи—0,55—0,65.

Для печей периодического действия значение η_k колеблется в зависимости от температуры материала.

При приближении температуры материала к температуре факела и небольшой потере тепла в окружающую среду значение η_k может достигать 0,9.

Для определения температуры факела необходимо учесть теплоотдачу от факела в действительных условиях. Решение этой задачи представляет значительные трудности, так как печь по длине необходимо разделить на участки и для каждого из них составить приближенный тепловой баланс, основанный на ряде допущений. Действительная температура газов $T_{г,м}$ °К определяется из выражения:

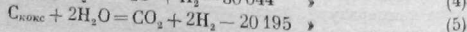
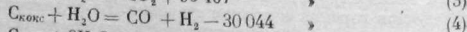
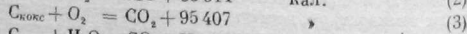
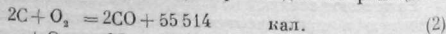
$$T_{г,м} = \frac{Q_{г}^0 + Q_{в} + Q_{г} - Q_{з} - Q_{ок}}{V_{г} \cdot c_{г}}$$

где $Q_{г}^0$, $Q_{в}$, $Q_{г}$, $Q_{з}$ и $Q_{ок}$ соответственно: теплотворная способность топлива, теплота нагрева воздуха, теплота нагрева газа, потеря тепла от химической неполноты горения, потеря тепла в окружающую среду и $V_{г}$ — выход продуктов горения в м³ на единицу топлива, а $c_{г}$ —удельная теплоемкость продуктов горения в кал/м³ град.

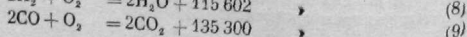
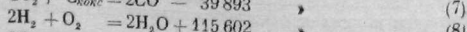
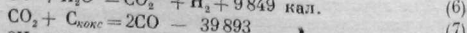
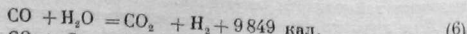
4. ГОРЕНИЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

При нагревании твердого топлива оно разлагается. Следовательно, в этом случае нужно рассматривать горение как газообразного топлива, так и твердого углеродистого остатка.

При горении углерода протекают реакции взаимодействия его с кислородом воздуха и парами воды, содержащимися в воздухе. Взаимодействие C с O₂ и H₂O происходит по реакциям:



При этом также протекают реакции:



При сжигании углеродистого остатка топлива, в результате протекания реакций образования CO и H₂ (реакции 2, 4, 5, 6, 7), из слоя топлива в топочное пространство поступает горючий газ, который сгорает над слоем топлива или в печи.

Процесс горения углерода очень сложен и зависит от химических и физических факторов. При горении углерода происходят три процесса: подвод кислорода путем диффузии к поверхности углерода, соединение кислорода с углеродом на его поверхности (первичная реакция) и изменение продуктов сгорания в газовой среде, а также на поверхности углерода при вторичном попадании на его поверхность.

У поверхности твердых тел находится малоподвижная пленка газа (ограниченный слой), оказывающая основное сопротивление диффузии. С увеличением скорости газов толщина пленки уменьшается и скорость реакции увеличивается.

Согласно современным взглядам на механизм горения углерода, при воздействии кислорода на углерод одновременно происходит образование окиси углерода (возможно и углекислоты) и углеродно-кислородного комплекса, разлагающегося на CO и CO₂.

При нормальном давлении и при температурах выше 700—800° увеличивается роль реакций, ведущих к получению на поверхности углерода окиси углерода.

Скорость окисления углерода растет с температурой. При температуре выше 900° скорость окисления лимитируется только скоростью диффузии газов (рис. 19), а ниже 700°—только скоростью собственно химического процесса.

Скорость окисления углерода растет с увеличением содержания кислорода в обтекающих топливо газам и скоростью газов.

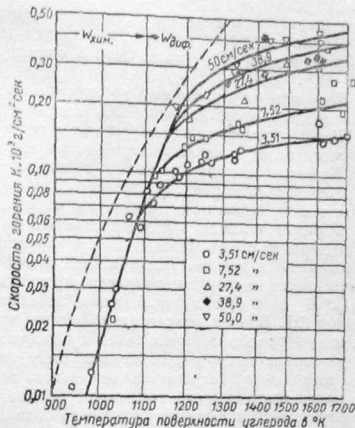


Рис. 19. Скорость горения углерода в смеси азота и кислорода в зависимости от температуры углерода и скорости движения газов:

$W_{\text{диф}}$ —сопротивление диффузии, $W_{\text{хим}}$ —сопротивление химической реакции (тугитерий дания дает расчетную скорость горения при сопротивлении диффузии, равной нулю).

В температурном интервале, в котором решающее значение имеет диффузия, скорость горения изменяется пропорционально массовой скорости газа (массе газа в единицу времени) в степени 0,6—0,8.

Вторичными процессами являются окисление CO в избытке кислорода и восстановление CO₂ в присутствии углерода.

Горение углерода на колосниках и летучих в топочном объеме не лимитируется временем пребывания их в топке.

Кусковое топливо сжигают в топках или непосредственно в рабочей камере печи. В последнем случае топливо можно подавать в печь также на слой материала или смешивать с ним.

Горение топлива в топках зависит от способа его подачи. При верхней подаче топлива на слой над колосниками находится зона золы и шлака. Выше в окислительной зоне интенсивно расходуется кислород и в качестве продукта горения преобладает CO₂. В дальнейшем, вследствие восстановления CO₂, растет выход CO. Высота окислительной зоны очень мала—40—60 мм. К получающимся горячим газам примешиваются продукты сухой перегонки и быстро выделяющаяся влага топлива, так как топливо интенсивно нагревается от стенок топки, топочных газов и ранее загруженного топлива. При благоприятном состоянии слоя первичный воздух не доходит до свежезагруженного топлива.

При подаче топлива параллельно решетке последнее загружается непосредственно на решетку и проходит все стадии горения, двигаясь с ней или по ней. Летучие выделяются в окислительной атмосфере.

В случае нижней подачи топливо проталкивается под слой. Колосники предохранены от нагревания. Летучие сгорают в атмосфере воздуха. Такие топки неприменимы для топлив с высоким содержанием влаги вследствие уноса влагой большого количества тепла и сильного понижения температуры.

При верхней подаче твердого топлива сжигание газов частично переносит в рабочую камеру печи. Это позволяет сжигать твердое топливо с малым избытком воздуха, близким к единице, и в результате повышать достигаемые температуры и уменьшать расход топлива.

Увеличение подачи первичного воздуха в топки возможно лишь до момента, пока слой становится нестабильным и в нем образуются промежутки, через которые проходит неиспользованный воздух. Это имеет большое значение для медкого воздуха.

В топках с простой горизонтальной решеткой непосредственно после загрузки наблюдается недостаток воздуха. Через некоторый промежуток времени неиспользованный воздух проходит через образовавшиеся прогары и промежутки между спекшимися кусками. Наблюдается большой избыток воздуха. Такая неравномерность горения менее свойственна тощим сортам углей. С увеличением высоты слоя достаточно крупного топлива улучшается использование кислорода в слое и состояние слоя, и горение во

времени является более устойчивым; при улучшении распределения топлива по сечению решетки образование прогаров уменьшается. Равномерное распределение воздуха достигается уменьшением живого сечения решетки и увеличением сопротивления решетки по отношению к сопротивлению слоя топлива.

В топках с наклонной колосниковой решеткой в некоторых случаях условия горения топлива улучшаются. Прогоревшие места быстро заполняются сплюскающим сверху топливом. Это наблюдается при достаточно большом угле (30—33°) наклона топлива, близком к углу естественного откоса.

При нижней подаче условия нагрева топлива неблагоприятны, поэтому имеет большее значение скорость воспламенения топлива. При увеличении подачи первичного воздуха плоскость воспламенения отодвигается к поверхности слоя и интенсивность горения ограничена сравнительно узкими пределами.

В случае подогрева первичного воздуха уменьшается расход топлива. При работе на топливе с высоким содержанием влаги и при нижней подаче его подогрев воздуха также улучшает условия горения, позволяя повысить температуру в топке. В остальных случаях степень подогрева воздуха ограничивается плавлением золы и нагревом колосников.

Количество вторичного воздуха составляет 10—15% всего воздуха. При повышением слое и, следовательно, меньшем прорыве воздуха количество вторичного воздуха возрастает до 30—60%. В последнем случае топки называют подугаровыми.

Для быстрого и полного дожигания топочных газов вторичный воздух подводится под углом к струе газов несколькими трубками. Скорость движения воздуха 10—15 м/сек. При этом можно достичь высокого напряжения топочного объема.

5. КОНСТРУКЦИЯ ТОПОК ДЛЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Различают топки с ручной и механической загрузкой топлива. Первые особенно широко распространены, так как они просто устроены и дешевы. Коэффициент полезного действия их недостаточно высок вследствие неравномерности работы. Применение механических решеток позволяет повысить коэффициент полезного действия и облегчить обслуживание топки. Целесообразно снабжать топки искусственным дутьем.

Ручные топки с горизонтальной решеткой (рис. 20 и 21) дают удовлетворительные результаты при тщательной и частой загрузке и шуровке. Желательно применять плитчатые колосники со щелевыми отверстиями (ширина 4—6 мм) и ребрами для охлаждения. Часть колосников делают опрокидывающимися с ручным приводом для удобства удаления золы и шлака. Живое сечение решетки составляет 8—15% всей ее площади (меньший предел для мелочи, больший—для кускового угля). При естественной тяге часто применяют балочные колосники с живым сечением для дров, торфа и каменного угля 25—30% и для антрацита

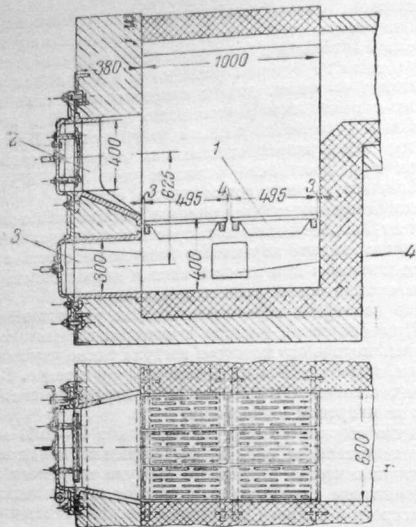


Рис. 20. Ручная топка с горизонтальной решеткой:
1—плиточные колосники; 2—загрузочное отверстие; 3—золин-
никовое отверстие; 4—отверстие для дутья.

8—15%. Ширина прозоров для торфа и угля 10—15 мм, дров — 20—30 мм и антрацита — 5—12 мм. По условиям обслуживания топок с ручной загрузкой топлива длина колосниковой решетки не должна превышать 2,0 м и ширина 1,3 м на одну загрузочную дверцу. Минимальные размеры дверцы — высота 0,4 и ширина 0,45 м. Высота порога загрузочной дверцы над решеткой принимается в зависимости от высоты слоя топлива. Высота зольникового пространства 0,3—0,6 м. С передней стороны топки располагается фронтальная плита шириной 750—1000 мм, к которой крепят топочную и зольниковую дверцы.

Дутьевые топки не заглубляют. Топки высокотемпературных печей располагают возможно ближе к рабочей камере.

Наклонные колосниковые решетки применяют при сжигании низкосортных угловых топлив и торфа, содержащих повышенные количества золы и влаги. Особенно распространены топки со ступенчатой решеткой. Подобная топка представлена на рис. 22. Топливо из бункера 1 поступает на неподвижную топочную плиту 2, а затем на ступенчатую решетку, состоящую

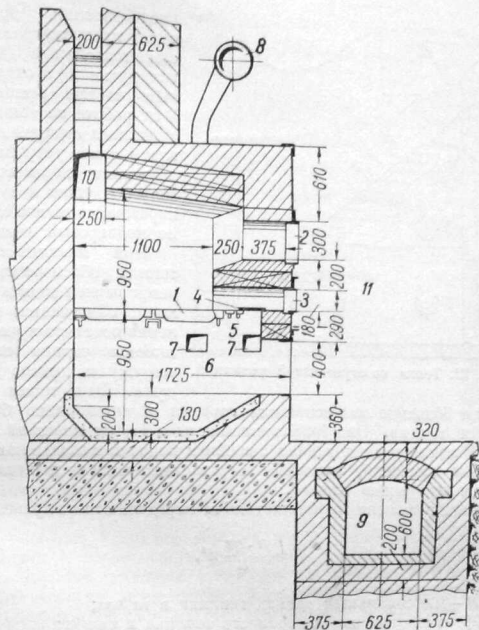


Рис. 21. Ручная топка для твердого и газообразного топлива:
1—балочные колосники; 2—загрузочное отверстие; 3—отверстие для
чистки; 4—плита для закладки топлива; 5—отверстие для сброса
шлака в зольник; 6—зольник; 7—отверстие для дутья; 8—воздухопро-
вод; 9—газоровод генераторного газа; 10—отверстие для ввода в
топку генераторного газа; 11—примок для обслуживания топки.

из чугунных плоских ступеней 3 (шириной 100—200 мм), укрепленных на наклонных балках 4. Для проталкивания топлива и шуровки служит специальная дверца 5. К наклонной решетке снизу примыкает горизонтальная решетка 6 для выжигания шлака. Между горизонтальной решеткой и нижним коном наклонной решетки имеется просвет высотой 60—100 мм для чистки решетки и выгребания шлака. Уклон решетки можно изменять с помощью приспособления 7. Расстояние между ступенями 60—80 мм. Для улучшения обслуживания несколько ступеней в нижней части решетки делают подвижными от ручного привода. Для улучшения

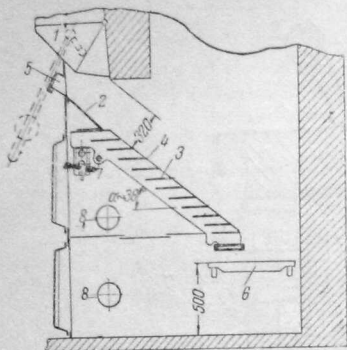


Рис. 22. Топка со ступенчатой решеткой.

дускают большую интенсивность горения и применение более зольных топлив. Они более экономичны и имеют меньшие размеры. В механических топках с верхней подачей используют барабанные питатели, наклонно переталкивающие и цепные решетки и шнуровые планки.

Площадь колосниковой решетки $F, м^2$ определяют из выражения:

$$F = \frac{B \cdot Q_2^2}{R} \text{ м}^2, \quad (10)$$

где: B — максимальный расход топлива в кг/час;
 Q_2^2 — теплотворная способность топлива в кал/кг;
 R — допустимое тепловое напряжение в кал/м² час.
 Значения R приведены в табл. 4.

Толщина слоя топлива составляет: для каменного и бурого углей 100—300, антрацита 60—120, дров и торфа 300—500 мм.

Высота свободного пространства в топке зависит от условий дожига газов и составляет 0,3—1 м.

Высота топочного пространства (длина пути газов) для завершения процессов смешения и сгорания должна быть, примерно равной тридцатикратной толщине отдельных струй.

Коэффициент избытка воздуха α в топках полного сгорания составляет для ручных топок при сжигании торфа, дров, щепы и сортированного антрацита 1,3, при сжигании бурых и каменных углей — 1,4 и при сжигании мелочы (АРШ, угольные отходы, косовая мелочь) — 1,5. Соответствующие величины для механических топок — 1,25; 1,3 и 1,4. Для пылевидного топлива $\alpha = 1,2$.

распределения дутья часто предусматривают самостоятельный подвод дутья (8) к отдельным частям решетки. При работе на топливе с высоким содержанием влаги такое устройство позволяет подвести в зону подсушки и сухой перегонки топлива сильно подогретый воздух.

При механических топках обеспечивается непрерывная подача топлива, облегчается удаление остатков и уменьшаются отдачи тепла наружу и присос воздуха. Эти топки до-

Таблица 4

Тепловые напряжения колосниковой решетки

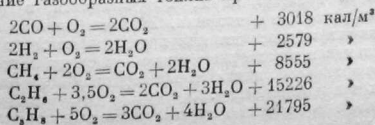
Тип топки	Вид топлива	Тепловое напряжение в 10 ⁴ кал/м ² час
С горизонтальной или наклонной решеткой, без дутья	Дрова и торф	500—700
	Бурый уголь	150—300
	Длиннопламенный каменный уголь	300—500
	Антрацит	400—600
То же, но с дутьем (50—100 мм вод. ст.)	Несортированный антрацит	890
	Сортированный антрацит	1000
	Каменный уголь	900
	Бурый уголь ($W^2 < 25\%$)	900
	Бурый уголь ($W^2 > 25\%$)	800
Шахтная Наклонная переталкивающая	Торф, дрова	1100
	Челябинский уголь	900
	Подмосковный уголь	750
Цепная	Антрацит АС	1200
	Каменный уголь	1300
	Бурый уголь	1000
	Торф	2000
	Щепа	1100

6. ГОРЕНИЕ ГАЗООБРАЗНОГО И ЖИДКОГО ТОПЛИВА

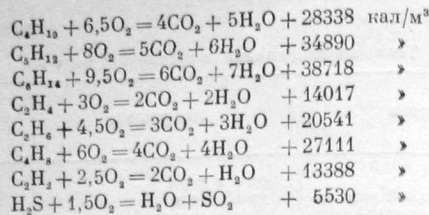
В обычных условиях горения могут происходить процессы окисления и термического разложения горючего с выделением сажи. Хорошее смешение углеводородов с воздухом и подогрев их препятствуют термическому разложению и выделению сажи. При плохом смешении нагрев горючей смеси вызывает разложение углеводородов. Данные о горючих газах приведены в табл. 5 и 6.

При горении с недостатком воздуха смесей углеводородов, H_2 и CO прежде всего в соединении вступают углеводороды, несколько медленно горит H_2 и наиболее медленно CO . Горение кислородных производных углеводородов подобно горению углеводородов.

Горение газообразных топлив протекает по реакциям*



* Теплотворная способность дана низшая.



Для устойчивого горения жидкого и газообразного топлива необходим очаг, поджигающий горючую смесь. Таким очагом являются сильно разогретые кладка и материял.

Часто при работе с низкими температурами (отжигательные и другие вспомогательные печи стекольной промышленности) печи оборудуют камерами предварительного сгорания («зажигательными» насадочками. В эти камеры подводит часть воздуха для горения. Небольшая часть топлива сгорает, разогревая насадку, являющуюся источником тепла, обеспечивающим воспламенение горючей смеси, а иногда и получение тяги (геометрического напора) для подвода горючего газа и воздуха в печь.

Организация процесса сжигания в печах жидкого и газообразного топлива проще, чем твердого топлива, в силу отсутствия периодических загрузок и шуровок и необходимости удаления золы и шлака, удобств и легкости регулирования соотношения количеств топлива и воздуха, состава газов и распределения температур. В зависимости от характера подготовки топлива (подачи избыточного воздуха, качества смешения горючей смеси или распыления жидкого топлива и т. д.) можно регулировать длину и светимость факела. Светимость факела обусловлена присутствием в газах частичек сажиного углерода — продукта распада углеводородов.

7. ПРИБОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ СЖИГАНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА

Жидкое топливо сжигают, предварительно испаряя его или распыляя для улучшения смешения с воздухом.

1. Испарительные и капельниковые приспособления. В приспособлениях для испарения жидкого топлива перемешиваются воздух и горючие пары, получающиеся в результате испарения и разложения топлива. Жидкое топливо наливают в плоские корытца-колосники или подают каплями с помощью трубок-капельников в нагретые камеры — в среду нагретого воздуха. Колосники располагают в непосредственной близости от излучающих тел или пламени.

В результате разложения нефтепродукта выделяются частицы углерода — нефтяного кокса, оседающие на поверхностях каналов и горелок.

Испарительные и капельниковые устройства несовершенны и применяются в небольших, преимущественно лабораторных, оборудовании, а также в установках временного характера.

2. Распыляющие приспособления (форсунки). Для увеличения поверхности испарения жидкого топлива и поверхности соприкосновения топлива и воздуха, а также возможности сжигания трудно испаряющихся топлив применяют форсунки, мелко распыляющие топливо. С помощью форсунок также можно регулировать подачу мазуа, а в некоторых конструкциях и воздуха.

Для раздробления струи жидкого топлива приводит в соприкосновение с быстро движущейся струей воздуха или пара или же, наоборот, тонкую, быстро движущуюся струю жидкого топлива направляют в неподвижную газовую среду.

При достаточно большой относительной скорости газа или жидкости начинается отрыв частиц жидкости от основной массы, рассеяние и измельчение их до величины частиц тумана. Турбулентность струи усиливает это явление. Поверхностное натяжение противодействует распаду струй.

Если придать жидкому топливу вращательное движение, то каждая частичка по выходе будет стремиться сохранить различно направленную тангенциальную составляющую скорости. В результате происходит интенсивный разрыв капель. Этот фактор также используется для распыления жидкого топлива.

Жидкое топливо и распыляющая среда должны встречаться в том месте, где последняя имеет максимальную скорость, т. е. в форсунке. В дальнейшем следует предотвращать укрупнение капель.

Форсунки разделяют на три группы:

- 1) с распылением за счет вспомогательной среды (низкого и высокого давления);
- 2) механические, с распылением за счет сжатия распыляемого топлива;
- 3) смешанного типа, в которых распыление происходит одновременно за счет вспомогательной среды и сжатия распыляемого топлива.

В форсунках высокого давления (рис. 116) распыляющей средой служит пар или воздух. Для получения критической скорости у сопла необходимо давление воздуха около 2 ата, а пара — несколько меньше. Обычно работают с давлением распыляющей среды в 4—12 ати. Это связано с необходимостью преодолеть сопротивление трубопроводов, вентилей и самой форсунки.

Форсунки высокого давления по конструкции могут работать как при паровом, так и при воздушном распылении, однако, производительность их в обоих случаях разная.

Давление распыляющей среды лучше использовать при применении сопла, по форме соответствующего очертанию вытекающей струи, часто комбинируемого с диффузором. Сопло дает воз-

возможность получить наибольшую скорость истечения при больших давлениях и, следовательно, обеспечивает лучшее распыление топлива. Оно также улучшает направление факела по оси форсунки.

Диффузор дает возможность использовать значительную часть динамического напора и, следовательно, понизить давление у широкого конца сопла.

Расход воздуха при давлении 3—4 ати составляет 7—10% количества, расходуемого на горение. С уменьшением давления расход воздуха увеличивается:

Давление (в ати)	0,025	0,05	0,1	0,2	0,5	1,0	5,0
Количество воздуха для распыления в % требуемого для горения	60	47	38	30	22	15	9

Расход воздуха может быть больше указанного и лишь при особо благоприятных условиях — меньше. Расход пара на распыление составляет 0,2—0,6 кг/кг мазута. Расход распылителя уменьшается с увеличением производительности форсунок.

Воздушные и паровые форсунки могут присасывать воздух в камеру сгорания и при довольно значительном положительном давлении в печи.

В форсунках низкого давления распыляющей средой служит воздух. Давление воздуха составляет до 1000 мм вод. ст., так как используемые для подачи воздуха центробежные вентиляторы обычно не дают большего давления.

В форсунках низкого давления большой объем и малая скорость воздуха вынуждают применять большие выходные отверстия, что затрудняет использование всей массы распылителя для распыления. Для повышения к. п. д. форсунок низкого давления применяют двух- и трехступенчатое внутреннее распыление (рис. 23) и создают сильное завихрение (вихревые форсунки), что увеличивает силы трения и турбулентность потока и позволяет использовать кинетическую энергию всей массы распылителя.

Распыление производится холодным или незначительно подогретым воздухом. Скорость его на выходе в форсунках низкого давления составляет 50—75 м/сек.

Многие форсунки имеют для воздуха щель неизменных размеров. Воздушный наконечник делают сменным на случай изменения производительности или прогара. Эти форсунки не обеспечивают хорошего распыления и смещения воздуха с горючим при значительных отклонениях производительности от нормальной.

Для регулирования мощности форсунки без дроселирования воздуха или топлива и без ухудшения качества распыления в некоторых форсунках предусматривают регулирование размеров выходных щелей путем перемещения наконечников.

В случае применения форсунок низкого давления большое значение имеет сведение к минимуму бесполезных потерь давления воздуха в трубопроводах.

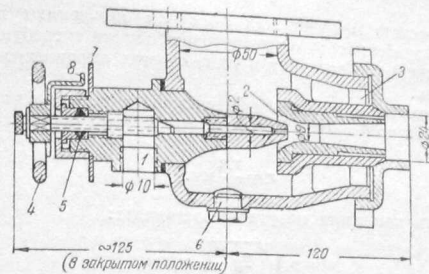


Рис. 23. Форсунка низкого давления:
1—отверстие для подвода мазута; 2—подвод первичного воздуха; 3—подвод вторичного воздуха; 4—регулирующий вентиль для мазута; 5—войлочная набивка; 6—отверстие для спуска мазута; 7—штыль; 8—указатель подачи мазута.

В форсунку можно подвести весь требуемый для горения воздух и конструкция ее должна обеспечивать возможность наилучшего распыления мазута, например, с помощью вращательного движения воздушной струи. Применяющиеся для этой цели крыльчатки форсунок «Эрит» быстро выходят из строя. Устройства направляющих в теле форсунок (форсунки Стальпроекта, ЦНИИМАШ и др.) вполне себя оправдало.

Обычная производительность форсунок низкого давления — 15—50 кг/час.

Механическими форсунками называют приспособления, в которых распыление происходит за счет сжатия самого топлива до 10—12 ати. Топливо с большой скоростью вытекает из малого отверстия в виде спиралей и распыляется благодаря трению и центробежной силе. Скорость истечения топлива составляет примерно 45—50 м/сек.

При механическом распылении воздух не может быть присосан форсункой.

Можно распылять топливо частично за счет энергии сжатого пара или воздуха и частично за счет кинетической энергии струи топлива. В этих случаях топливо вытекает под давлением до 4 ати и, кроме того, подается пар под давлением в несколько атмосфер или воздух с давлением до 600 мм вод. ст.

Распыление за счет давления мазута в пределах 1,5—4 ати незначительно. В большинстве случаев механические форсунки ошибочно относят к форсункам смешанного типа, исходя из подачи мазута под таким давлением. Установка насосов для подачи мазута в линию форсунок под давлением 1,5—4 ати обычно преисполняет цели бесперебойного питания мазутом и преодоления сопротивлений.

При расчете механических форсунок определяются выходное сечение в зависимости от производительности и требуемой скорости истечения. Последняя в свою очередь определяется размером капли.

При давлении мазута перед форсункой p ати радиус капли r мм определяется по формуле Всесоюзного теплотехнического института

$$r = \frac{7,8}{p} \text{ мм.} \quad (11)$$

Скорость истечения мазута w составляет:

$$w = \mu \sqrt{2g \frac{10p}{0,9}} \text{ м/сек.} \quad (12)$$

Коэффициент истечения μ равен 0,4—0,6.

Производительность форсунки B равна:

$$B = 3600 w F \gamma \text{ кг/час,} \quad (13)$$

где: F —площадь отверстия форсунки в м²;

γ —объемный вес мазута в кг/м³.

В форсунке низкого давления скорость истечения воздуха определяется по формуле:

$$w = \mu \sqrt{2g \frac{h}{\gamma}} \text{ м/сек.,} \quad (14)$$

где: μ —коэффициент расхода, зависящий от конструкции форсунки и равный 0,8—0,65;

h —избыточное давление воздуха в мм вод. ст.;

g —ускорение силы тяжести, равное 9,81 м/сек²;

γ —удельный вес воздуха в кг/м³.

Зная скорость, определяют живое сечение воздушной щели:

$$\omega = \frac{V}{w} \text{ м}^2, \quad (15)$$

где V —количество воздуха, проходящего через форсунку, в м³/сек.

Диаметр воздушного отверстия определяется также по эмпирической формуле:

$$D = \frac{k \sqrt{Qa}}{\sqrt{p_0}} \text{ мм,} \quad (16)$$

где: Q —расход мазута в кг/час;

a —количество воздуха, расходуемого на распыление в долях общего количества, требуемого для горения.

p_0 —давление воздуха перед соплом форсунки в мм вод. ст.;

k —коэффициент, принимаемый в прямых наконечниках равным 35 и в вихревых—38.

Скорость мазута в трубке форсунки низкого давления принимается в пределах 0,3—1 м/сек и высокого давления до 5 м/сек.

Однако во избежание засорения диаметра нефтяного отверстия не должен быть меньше 2—3 мм.

В мощных форсунках скорость мазута может превышать 5 м/сек и расчет ведется по формулам истечения жидкостей.

В форсунках высокого давления радиус капли r мм определяется по формуле Всесоюзного теплотехнического института:

$$r = \frac{1357}{\omega^2} \text{ мм,} \quad (17)$$

где: ω —относительная скорость капли и среды в м/сек.;

γ —удельный вес распыляющей среды в кг/м³.

При паровом распылении, давлении пара выше 2 ата и отсутствии расширяющегося наконечника площадь паровой щели F определяется из выражения:

$$F_n = \frac{G_n}{\beta \sqrt{\frac{p_1}{v}}} \text{ м}^2, \quad (18)$$

где: G_n —расход пара в кг/сек;

p_1 —абсолютное давление пара в кг/м²;

v —удельный объем пара в м³/кг;

β —коэффициент, равный для насыщенного пара 1,99 и для перегретого—2,09.

При воздушном распылении площадь воздушной щели F_a форсунки высокого давления ($p_1 > 2$ ата) определяется из выражения:

$$F_a = \frac{G_a}{83 p_1} \text{ м}^2, \quad (19)$$

где: G_a —расход воздуха в кг/час;

p_1 —абсолютное давление воздуха, в кг/м².

3. Примененные форсунки. При высоком подогреве воздуха преимущественно применяют форсунки высокого давления или механические, что вызывается желанием вывести в печь, минуя форсунку, максимальное количество подогретого воздуха.

Выбор способа распыления определяется экономическими соображениями.

Стоимость эксплуатации форсунок высокого давления значительно выше, чем механических и воздушных форсунок низкого давления. Сравнительно с механическими эти форсунки имеют дополнительный недочет, заключающийся в создании сильного шума при работе. Паровые форсунки, кроме того, вносят небольшое количество балласта в виде пара. Преимуществом форсунок высокого давления является возможность значительного подогрева воздуха для горения, простота обслуживания и широкие пределы регулирования.

Паровые форсунки плохо себя зарекомендовали при использовании для распыления насыщенного пара вследствие значительной конденсации его в паропроводе, что приводит к взрыво-

вание топлива в печь в виде крупных капель. При использовании перегретого пара паровые форсунки работают удовлетворительно.

Если требуется короткое пламя и температура очага невысока, паровые форсунки не применяют, так как пламя может быть погашено паром.

Причина распространения паровых форсунок заключается в простоте оборудования и наличии пара в любом производстве.

Стоимость распыления скатым воздухом высокого давления выше, чем при остальных способах распыления.

Воздушные форсунки высокого давления применяют преимущественно на заводах с мощным компрессорным хозяйством.

Воздушные форсунки низкого давления требуют минимальных капиталовложений и наиболее дешевы в эксплуатации.

При использовании для сжигания холодного или подогретого до невысокой температуры воздуха применяют форсунки низкого давления, если только не требуются широкие пределы регулирования.

Механические форсунки, бесшумные и более дешевые в эксплуатации, используют в больших установках. Затраты на их установку значительные. Наблюдается закоксовывание и засорение отверстий наконечников. Регулировать производительность отдельных форсунок невозможно.

8. ГАЗОВЫЕ ГОРЕЛКИ

1. Виды горелок. Горелки различают по способу подачи газа и воздуха, характеру смешения газа и воздуха и характеру пламени. Газ и воздух могут быть поданы в печь отдельно или частично и полностью смешанными.

В зависимости от степени смешения газа и воздуха и характера подаваемого пламени различают пламенные и беспламенные горелки. В беспламенных горелках газ и воздух смешиваются настолько полно, что при нагреве смеси до температуры воспламенения горение происходит почти мгновенно. Газ полностью смешивается с воздухом еще до выхода из горелки. Пламя представляет собой темный конус, окруженный небольшим, ярко светящимся ореолом, в котором на очень коротком пути полностью протекают реакции горения. Видимого длинного пламени нет, так как продукты полного сгорания прозрачны.

Различают два типа горелочных устройств, в которых газ и воздух полностью смешиваются до поступления в печь. В одних газ и воздух смешиваются до поступления в горелку, в других — в самой горелке. Горелки первого типа называют горелками предварительного смешения. Горелками второго типа являются инжекционные.

Газовые потоки перемешиваются за счет молекулярной и молярной диффузии. Обычно для смешения основное значение имеет молярная диффузия, сопровождающаяся переносом масс

из одного слоя в другой. Молекулярное перемешивание происходит медленно и имеет практическое значение только в так называемых диффузионных горелках при перемешивании тонких струй. Вытекающие из таких горелок струи газа и воздуха движутся параллельными потоками с небольшой и одинаковой скоростью. Смешение и горение протекает медленно. Скорость диффузии прямо пропорциональна температуре в степени 1,7—2. Однако влияние температуры уменьшается вследствие увеличения объема газа при повышении температуры. Смешение улучшается с уменьшением удельного веса газов.

При подводе в печь газа и воздуха, подогретых до высокой температуры, обычно применяют горелки, в которых газ и воздух смешиваются по выходе из горелки. Если же газ и воздух, нагретые выше температуры воспламенения, смешиваются в горелке до поступления в пламенное пространство, то в горелке газ интенсивно горит. Вследствие отсутствия холодных поверхностей и малой прямой отдачи тепла температура смеси быстро повышается. Понятие «смешение» в данном случае условно подменяет понятие сгорания и подготовки смеси для дальнейшего горения. Такие горелки называют горелками с предварительным сжиганием части газа.

Можно смешивать газ в горелке с частью требуемого для горения воздуха, а остальной воздух подавать в печь. Такие горелки применяют при холодном или слабо подогретом воздухе.

Смешение газа и воздуха в беспламенных горелках достигается проще всего инжектированием газом воздуха или наоборот. Если газ инжектирует воздух, можно избежать применения воздухопроводов. Механические смесители (с помощью вентилятора) применяют редко, так как они очень сложны и дороги.

При засасывании воздуха газом или наоборот определенное соотношение газа и воздуха поддерживают автоматически.

Хорошее смешение, обеспечиваемое применением инжекционных горелок, позволяет достигать полного сгорания при теоретическом или близком к нему избытке воздуха.

Беспламенные горелки состоят из трех частей: смесителя, газопровода и собственно горелки с туннелем. Назначение туннеля — создать зону высоких температур, обеспечивающую закипание смеси, уменьшить скорость выхода продуктов горения в печь и придать им необходимое направление, а также уменьшить шум. Туннели должны быть достаточно стойкими. Их изготавливают из высокоуглепункрного материала (алюда, карбонда и др.). Толщина их стенок составляет 25—30 мм.

На рис. 24-а представлена беспламенная горелка инжекционного типа со смесителем 3. При вытекании сжатой струи из сопла 1 в горелочное смесителя создается отрицательное смесительное пространство, вызывающее присос воздуха (газа) из окружающего пространства. Чем больше скорость вытекания струи, тем больше разрежение и количество присасываемого воздуха (газа).

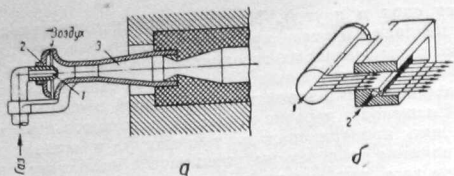


Рис. 24. а—Беспламенная горелка. б—Диффузионная горелка: 1—подвод воздуха, 2—подвод газа.

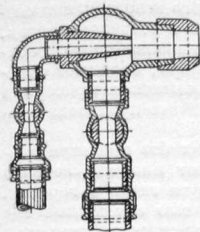


Рис. 25. Пламенная горелка с одноступенчатой подачей воздуха и частичным смешением.

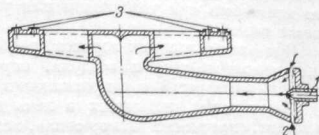


Рис. 26. Атмосферная горелка: 1—ввод газа; 2—щель для засасывания воздуха; 3—отверстие для выхода газовой смеси.

воздуха также зависит от давления в рабочей камере печи, в которую подается смесь. Чем оно выше, тем меньше разрежение в смесителе и количество присасываемого воздуха. Для уменьшения сопротивления смесителя и возможности более полного использования скоростного напора газовой смеси смесителю придают форму диффузора. Шайба 2 служит для регулирования количества присасываемого воздуха. Через отверстие в конце горелки смесь подводится к туннелю и в печь.

Описанная горелка имеет одноступенчатый смеситель. В двухступенчатом смесителе часть воздуха инжектируется газом, а часть—газовоздушной смесью. Горелка с двухступенчатым смешением сложнее, но допускает регулирование в более широких пределах, дает лучшее смешение и требует меньшего давления. При расходе воздуха, превышающем $2,5 \text{ м}^3$ на 1 м^3 газа, применяют двухступенчатые смесители. В первой ступени подается 40–60% всего воздуха.

Производительность инжекционной горелки—до $250 \text{ м}^3/\text{час}$ коксового газа.

Если на несколько горелок устанавливают один смеситель, устройство удешевляется, но можно регулировать только группы горелок. Недостатком является также возможность воспламенения смеси в соединительных газопроводах, неровного горения и шума при совпадении периода колебания пламени в печи с периодом колебания смеси в газопроводе.

В горелках полного предварительного смешения допустим подогрев воздуха до 300° , а в горелках с частичным смешением в горелке и частичным на выходе—до 400° .

Минимальное давление воздуха, подогретого до низких температур при поступлении в инжекционную горелку, 50 мм вод. ст.

Различают несколько типов горелок со смешением газа и воздуха до и после выхода их из горелки.

На рис. 25 показана горелка с одноступенчатым смешением газа и воздуха. Смешение начинается в горелке и заканчивается в печи. Производительность такой горелки достигает $200 \text{ м}^3/\text{час}$. Давление воздуха должно быть не ниже 100 мм вод. ст. Подогретый до низких температур воздух дол-

жен подаваться под давлением не ниже 200 мм вод. ст. Перемешивающие вставки и тангенциальный подвод воздуха, используемые в горелках, называемых вихревыми, улучшают смешение и ускоряют факул. Устройством подвижного внутреннего сопла позволяют регулировать длину факула.

В так называемых атмосферных горелках (рис. 26) смешение воздуха с газом двухступенчатое. Смешение первичного воздуха (~50%) заканчивается полностью в горелке. Остальная часть воздуха засасывается печью. Из горелки вытекает смесь, не способная взорваться, поэтому скорость истечения может быть малая (2–6 м/сек.); требуемое давление газа 80–200 мм вод. ст.

Атмосферная горелка состоит из смесителя и собственно горелки (рожка). Диаметр сопла $d = 3\text{--}6 \text{ мм}$, длина 3–5 d.

Смесители рассчитывают и конструируют аналогично смесителям инжекционного типа.

В диффузионных горелках струи газа и воздуха движутся параллельными слоями с одинаковыми скоростями. Подогрев воздуха допускается до 600° . Если скорость движения газов зна- чительна и смешение происходит не только за счет диффузии, то эти горелки лишь условно могут быть названы диффузионными.

На рис. 24-б представлена такая горелка, дающая светящуюся длинную факул. Вследствие постепенного сгорания можно получить нагретый факул. Значительная часть газа перед сгоранием выделяется вается. В результате разложения углеводородов выделяются большие количества сажи и углерода, придающего пламени светимость и повышающего излучение. Добавкой дымовых газов регулируют горение.

При регулировании газовых горелок требуется поддерживать постоянное соотношение количества газа и воздуха. Можно применять ручные и автоматические устройства, с помощью которых устанавливают это соотношение. При этом давление газа и воздуха

необходимо поддерживать постоянным для чего используются специальные автоматические регуляторы на газо- и воздухопроводах.

Горелки предварительного смешения и инжекционные, работающие на воздухе, засасываемом из атмосферы, обладают свойством саморегулируемости, т. е. раз установленная пропорция не изменяется при увеличении или уменьшении производительности горелки.

При расчете газовых горелок, работающих без предварительного смешения газа и воздуха, определяют площадь сечения выходных отверстий и сопротивления на пути газов в горелке.

Для горелок, подающих в печь полностью смешанные газ и воздух, определяют размер сопла, исходя из скорости истечения смеси при минимальной нагрузке. Эта скорость должна превышать скорость распространения пламени во избежание проскакивания пламени в горелку. Минимальная скорость выхода смеси газов зависит от температуры смеси и не должна быть ниже при $0^{\circ}-3^{\circ}$, при $200^{\circ}-7^{\circ}$ и при $400^{\circ}-15^{\circ}$ м/сек. Минимально допустимое давление в горелке составляет: для паровоздушного генераторного газа—5, природного—8, коксового—13 и водяного—25 мм вод. ст. Для возможности регулирования расхода давление в горелке должно быть в несколько раз больше.

Чем выше теплотворная способность газа, тем больше должно быть давление газа для присоса воздуха. С учетом необходимости регулирования работы горелок и во избежание обратного удара пламени в горелку давление газа с $Q_n=900-1250, 1250-1500, 1500-2000, 4000-6000$ кал/м³ составляет соответственно 500—1000, 750—1500, 1000—2000 и 3000—5000 мм вод. ст.

Размеры сопла определяют по формуле истечения и часовому расходу газа:

$$f_{\text{сн}} = \frac{V}{\varphi \sqrt{\frac{19,62 \cdot h}{\gamma_{\text{см}}} \cdot 3600 \left(\frac{1}{n+1} \right)}} \text{ м}^2 \quad (20)$$

где: V —количество газа, проходящее через сопло в м³/час;
 $f_{\text{сн}}$ —площадь сопла в м²;
 φ —коэффициент истечения;
 h —давление газовой смеси в горелке в мм вод. ст. или кг/м²;
 $\gamma_{\text{см}}$ —удельный вес газовой смеси в кг/м³;
 n —количество воздуха, расходуемое на горение 1 м³ газа в м³.

Если давление среды больше чем в два раза превышает давление в печи, что имеет место при использовании природного газа, наконецник выподняют в виде специального сопла. В этом случае в самом узком сечении сопла устанавливается критическая скорость.

Практически производительность горелок предварительного смешения ограничивается размерами сопла, максимальный диа-

метр которого составляет для доменного, генераторного и природного газов 75 мм и для коксового и водяного—35 мм. При большом расходе газа устанавливают несколько горелок. Диаметр больше диаметра сопла. Площадь трубопроводов в 2—2,5 разой смеси должна быть в четыре раза больше площади сопел горелок, обслуживаемых данным участком трубопровода.

Смеситель, обычно инжекционный, рассчитывают как эжектор (см. главу II), т. е. определяют давление засасывающей среды необходимое для присоса требуемого количества другой среды и преодоления всех сопротивлений. Скорость смеси устанавливается по равенству энергий движущихся сред до и после смешения.

Труба инжектора состоит из коллектора, горла и диффузора. Односторонний угол раскрытия диффузора не должен превышать 6° во избежание отрыва струи.

Производительность смесителя инжекторного типа может быть очень большой, но обычно не превышает 160 м³/час генераторного газа и 80 м³/час коксового или природного.

По данным Восточного института топливоспользования (А. В. Арсеев) площадь сечения туннеля подсчитывается по действительной скорости газа 45—55 м/сек.; верхний предел ограничивается увеличением сопротивления, нижний—увеличением размеров туннелей и трудностью их размещения в точечной камере; длина туннелей принимается равной 500 мм.

При расчете горелок с частичным смешением газа с воздухом в горелке и частичным—по выходе из нее, скорость истечения смеси из сопла принимается равной 4—10 м/сек.

В диффузионных горелках скорость истечения выбирается с таким расчетом, чтобы для отверстия истечения Re было больше 3000 в случае генераторного газа и больше 5000 в случае светильного газа.

Данные о горелках с предварительным частичным сгоранием приведены на стр. 279, 294.

2. Применение газовых горелок. Горелки с постепенным смешением допускают получение светящегося, сильно излучающего пламени, которое дает возможность поддерживать равномерную температуру по длине факела и легко контролируется.

Диффузионные горелки применяют, если необходимо получить длинный факел с равномерной по длине температурой.

Применению чисто диффузионных горелок обычно препятствуют конструктивные неудобства подвода струй нагретых газов и воздуха, короткий путь газов в печи и образование маловязкого охлажденного слоя газов на поверхности обрабатываемого материала.

Для низкотемпературных процессов, например, сушки материалов, могут быть использованы атмосферные горелки. Они могут быть расположены в рабочей камере таким образом, что обеспечивают равномерное распределение температур.

В стекловаренных и многих других печах силикатной промышленности часто применяют горелки с предварительным частичным сжиганием газа, в которые целиком подают подогретые до высокой температуры горючий газ и воздух (рис. 99, 102). Вследствие развития высоких температур горелки выкладывают из огнеупорных керамических материалов. Газ и воздух обычно подают самостоятельно и под сравнительно небольшим давлением.

Беспламенные горелки позволяют работать с минимальным избытком воздуха (1%), развивать высокие температуры, достигать полного сгорания в малых печных объемах и легко поддерживать постоянное соотношение количеств газа и воздуха. Применение их все возрастает.

Если газы загрязнены смолой и пылью, не рекомендуется применять горелки предварительного смешения, инжекционные, атмосферные, вихревые и с узкими газовыми проходами, так как их трудно очищать от осадков, и особенно от смолы.

9. ГОРЕНИЕ ПЫЛЕВИДНОГО ТОПЛИВА

В пылевидном состоянии сжигают бурые и каменные угли, а также антрацит. Пылевидное топливо применяют как самостоятельно, так и в виде добавки к жидкому и газообразному. Угольную пыль добавляют в жидкое топливо для экономии последнего. Смесь называют коллоидальным топливом. Введение пыли в поток газового топлива (карбюрация газа) имеет целью повысить теплотворную способность газа и чернотность факела.

В силикатной промышленности пылевидное топливо используют во вращающихся печах. Пыль подается из бункеров шнеками, захватывается струей первичного воздуха и со скоростью 25—50 м/сек. вдувается в печь с помощью горелки.

Горение пылевидного топлива протекает в две фазы: первая — выделение и горение летучих и вторая, более медленная — горение кокса. Важным является надлежащий подвод кислорода и удаление продуктов горения с поверхности кокса. Первоначально потребители требовали определенный минимум содержания летучих. В дальнейшем выяснилась необходимость лишь более тонкого помола топлив с малым содержанием летучих. Повышенная влажность топлива затрудняет размола, увеличивает опасность самовозгорания пыли, ухудшает работу питателей и понижает теплотворную способность топлива. Поэтому перед размолотом топливо подсушивают. Для углей, содержащих влагу (W^p) в количестве, большем $W^{сип} + 10\%$, необходима предварительная сушка перед дроблением. Для углей, содержащих W^p в меньшем количестве, достаточна сушка в барабане мельницы, осуществляемая воздухом, нагретым до 300—350°.

Если допускают условия в пламенном пространстве, для уменьшения толщины газовой оболочки вокруг частичек кокса, препятствующей выгоранию, применяют вихревые горелки.

Скорость распространения пламени для смеси воздуха и угольной пыли растет с увеличением содержания летучих — она составляет 3—8 м/сек. и не превышает 13—14 м/сек. Скорость вылета аэросмеси из горелки должна быть соответственно больше.

Согласно исследований, при струйной подаче аэросмеси в прокатную печь, 90% пыли сгорает на расстоянии 2,35 м от горелки; сгорание остальной пыли сильно затягивается. Во вращающейся печи горение протекает медленнее и на расстоянии 2,5 м от горелки в газах содержится 50% пыли.

Допускается подогрет первичного воздуха не выше 150°. Количество первичного воздуха составляет: для антрацита 15—30%, тощих углей 25—40%, жирных—35—50% и газовых—45—60%.

10. ГОРЕЛКИ ДЛЯ ПЫЛЕВИДНОГО ТОПЛИВА

Горелки представляют собой трубу, вокруг которой, полностью или частично, подается вторичный воздух. Пылеугольные горелки должны создавать турбулентный поток для получения однородной смеси пыли и воздуха. Избегают резких поворотов во избежание сепарации пыли.

Давление первичного воздуха составляет 250—350 мм вод. ст. Скорость в устье горелок, которая не должна зависеть от нагрузки горелки, составляет 15—20 м/сек. Для горелок с длинным соплом малого размера она может быть повышена до 75 м/сек. Скорость вторичного воздуха составляет 10—20 м/сек.

В горелках высокого давления часть воздуха, необходимая для транспортирования пыли, подается под давлением 2,5—7 атм. Данные о горелках, используемых во вращающихся печах производства вяжущих материалов, приведены в главе XIV.

ГАЗИФИКАЦИЯ ТОПЛИВА

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ГАЗИФИКАЦИИ

Сущность процесса газификации

Горючую часть твердого топлива можно целиком превратить в газообразное топливо, воздействуя на нее кислородом при высокой температуре. Этот процесс называется газификацией, а получаемый газ — генераторным газом.

Кислород можно вводить в свободном виде (воздух, чистый кислород, обогащенный кислородом воздух) или же в виде газа или пара, содержащего кислород в связанном состоянии (водяной пар, углекислота).

Устройство, в котором получается генераторный газ — газогенератор, — обычно представляет собой шахту (рис. 27), в которую сверху загружают топливо, а снизу подают дутье.

Слой топлива в нижней части газогенератора раскален и углерод его взаимодействует с подаваемым в газогенератор дутьем. Получившийся газ омывает свежезагруженное топливо и нагревает его, в результате чего топливо подсушивается и подвергается сухой перегонке, выделяя газы, смоляные пары, уксусную кислоту и влагу разложения. Кокс, остающийся после перегонки топлива, опускается и углерод его взаимодействует с кислородом поднимающегося воздуха и водяным паром. В результате газификации от-

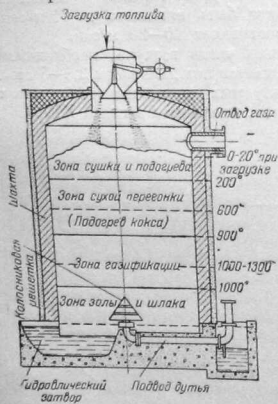


Рис. 27. Распределение зон в газогенераторе (цифрами показана температура топлива в градусах).

лива остаются безатики (провал): зола, шлак и куски негоревшего топлива, которые лежат на колосниках и периодически или непрерывно удаляются. Существуют специальные конструкции газогенераторов, в которых дутье подается сверху, а получаемый газ отводится снизу. В этом случае подушка, а перегонка топлива происходит за счет тепла, выделяющегося при его горении. Получаемый газ имеет более высокую температуру.

В газогенераторе различают зоны: подушки топлива, сухой перегонки, реакционную или газификации и зону золы и шлака (рис. 27).

В зоне газификации получается собственно генераторный газ, смешивающийся при дальнейшем движении с продуктами сухой перегонки и влагой топлива.

В зависимости от характера дутья, различают:

- 1) воздушный газ, получаемый при подаче в газогенератор воздуха;
- 2) водяной газ, получаемый при вдувании в газогенератор водяного пара;
- 3) паровоздушный газ, получаемый при подаче в газогенератор паровоздушной смеси;
- 4) парокислородный газ, получаемый при вдувании в газогенератор парокислородной смеси, и

Таблица 5

Удельный вес и теплотворная способность газов

Наименование газов	Химическая формула	Удельный вес газа в кг/м ³	Теплотворная способность (низшая)	
			в кал/кг моль	в кал/м ³
Водород	H ₂	0,0898	57 800	2 579
Кислород	O ₂	1,429	—	—
Азот	N ₂	1,251	—	—
Оксись углерода	CO	1,250	67 650	3 018
Углекислый газ	CO ₂	1,977	—	—
Воздух	—	1,293	—	—
Водяной пар	H ₂ O	0,804	—	—
Метан	CH ₄	0,717	191 759	8 555
Этан	C ₂ H ₆	1,356	341 262	15 226
Пропан	C ₃ H ₈	2,020	488 527	21 795
Бутан	C ₄ H ₁₀	2,850	635 185	28 338
Пентан	C ₅ H ₁₂	3,218	782 043	34 890
Гексан	C ₆ H ₁₄	3,840	869 000	38 718
Этилен	C ₂ H ₄	1,260	316 195	14 107
Пропилен	C ₃ H ₆	2,020	460 422	20 541
Бутилен	C ₄ H ₈	2,500	607 679	27 111
Ацетилен	C ₂ H ₂	1,173	300 095	13 388
Сероводород	H ₂ S	1,539	123 920	5 530
Сернистый ангидрид	SO ₂	2,927	—	—

5) регенеративный газ, получаемый при подаче в газогенератор углекислоты.

В табл. 5 приведены данные, характеризующие газы, входящие в состав генераторного газа и продуктов его горения, и в табл. 6 — данные о различных генераторных газах.

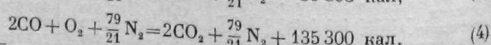
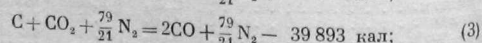
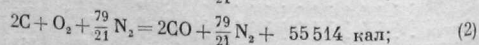
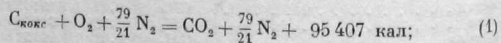
Таблица 6

Характеристика технических горючих газов

Наименование газа	Состав газа (в %)						Теплотворная способность (в кал/м³)
	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	C _m H _n	N ₂	
Естественный:							
Саратовский	—	—	—	93,2	2,4	4,4	8400
Дашавский	—	—	—	97,8	0,9	1,3	8500
Доменный	8,0	28,0	4,0	—	—	60,0	950
Коксовый	2,5	9,0	50,0	30,0	4,0	4,5	4500
Сланцевый	18,4	10,9	38,8	23,9	6,3	1,7	3900
Светильный	3,0	10,0	46,5	33,0	5,0	2,5	4700
Смешанный (70% доменного и 30% коксового)	7,9	22,0	16,4	9,0	1,2	43,5	2900
Паровоздушный генераторный газ из:							
дров	6,0	26,0	10,0	2,5	0,6	54,9	1380
торфа	8,0	28,0	15,5	2,8	0,4	45,3	1500
бурого угля	7,0	23,0	16,0	3,5	0,3	50,2	1400
каменного угля	4,5	25,0	13,0	2,0	0,2	55,3	1350
антрацита	7,0	25,0	12,0	0,8	0,1	55,1	1150
кокса	6,5	23,0	14,0	1,0	—	55,5	1140
Водяной	5,0	42,0	49,0	0,5	—	3,5	2500
Двойной водяной	7,8	33,8	51,1	5,0	0,8	2,5	3800
Полугаз из подмосковного угля (расчетный состав)	9,19	12,25	10,20	—	—	68,36	6751

Воздушный газ

При подаче в газогенератор чисто воздушного дутья в реакционной зоне протекают следующие реакции:



¹ Теплота нагрева 1 м³ полугаза — 303 кал.

Реакции (1) и (2) практически идут до конца, реакции (3) и (4) обратимы.

Состав воздушного газа, получаемого по реакции (2):

$$CO = \frac{2}{2 + \frac{79}{21}} \cdot 100 = 34,7\% \text{ и } N_2 = \frac{\frac{79}{21}}{2 + \frac{79}{21}} \cdot 100 = 65,3\%.$$

Теплотворная способность этого газа равна 1050 кал/м³.

Равновесие реакции $C + CO_2 \rightleftharpoons 2CO$ зависит от давления и температуры. Увеличение давления препятствует образованию окиси углерода, а понижение — способствует. С повышением температуры в равновесной смеси $C + CO_2 \rightleftharpoons 2CO$ углекислота переходит в окись углерода, так как идет процесс, связанный с поглощением тепла.

Константа равновесия обратной реакции (3):

$$K_p = \frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}}. \quad (5)$$

В табл. 7 приведена зависимость соотношения CO₂ и CO в равновесной смеси газов от температуры.

Таблица 7

Равновесный состав газа

Температура в град.	Смесь CO ₂ и CO в %		Газ, полученный при окислении углерода кислородом воздуха, в %		
	CO ₂	CO	CO ₂	CO	N ₂
500	94,6	5,4	17,1	6,4	76,5
600	76,8	23,2	10,1	18,1	71,8
700	41,3	58,7	3,1	29,4	67,5
800	12,4	87,6	0,6	33,7	65,7
900	2,9	97,1	—	34,7	65,3
1000	0,7	99,3	—	34,7	65,3

Чем выше температура, тем быстрее идет процесс восстановления углекислоты в окись углерода.

Для ускорения процесса газификации большое значение имеет характер топлива и остатка после сухой перегонки. «Молодые» топлива дают значительно более активный остаток, чем «старые». Повышению активности топлива способствует перегонка его при более низких температурах.

С повышением температуры скорость химических реакций растет быстрее, чем скорость диффузии через пограничный слой, и при высоких температурах скорость поверхностных реакций и при этом определяется скоростью диффузии газов. Поэтому при очень высоких температурах различие в реакционной способности

5) регенеративный газ, получаемый при подаче в газогенератор углекислоты.

В табл. 5 приведены данные, характеризующие газы, входящие в состав генераторного газа и продуктов его горения, и в табл. 6 — данные о различных генераторных газах.

Таблица 6

Характеристика технических горючих газов

Наименование газа	Состав газа (в %)						Теплотворная способность (в ккал/м ³)
	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	C _m H _n	N ₂	
Естественный:							
Саратовский	—	—	—	93,2	2,4	4,4	8400
Дашавский	—	—	—	97,8	0,9	1,3	8500
Доменный	8,0	28,0	4,0	—	—	60,0	950
Коксовый	2,5	9,0	50,0	30,0	4,0	4,5	4500
Славянский	18,4	10,9	38,8	23,9	6,3	1,7	3901
Светильный	3,0	10,0	46,5	33,0	5,0	2,5	4700
Смешанный (70% доменного и 30% коксового)	7,9	22,0	16,4	9,0	1,2	43,5	2000
Паровоздушный генераторный газ из:							
дров	6,0	26,0	10,0	2,5	0,6	54,9	1380
торфа	8,0	28,0	15,5	2,8	0,4	45,3	1500
бурого угля	7,0	23,0	16,0	3,5	0,3	50,2	1400
каменного угля	4,5	25,0	13,0	2,0	0,2	55,3	1350
антрацита	7,0	25,0	12,0	0,8	0,1	55,1	1150
кокса	6,5	23,0	14,0	1,0	—	55,5	2500
Водяной	5,0	42,0	49,0	0,5	—	3,5	3800
Двойной водяной	7,8	33,8	5,1	5,0	0,8	2,5	3800
Полугаз из подмосковного угля (расчетный состав)	9,19	12,25	10,20	—	—	68,36	6761

Воздушный газ

При подаче в газогенератор чисто воздушного дутья в реакционной зоне протекают следующие реакции:

$$C_{ж\text{о\text{к}}} + O_2 + \frac{79}{21} N_2 = CO_2 + \frac{79}{21} N_2 + 95\,407 \text{ кал;} \quad (1)$$

$$2C + O_2 + \frac{79}{21} N_2 = 2CO + \frac{79}{21} N_2 + 55\,514 \text{ кал;} \quad (2)$$

$$C + CO_2 + \frac{79}{21} N_2 = 2CO + \frac{79}{21} N_2 - 39\,893 \text{ кал;} \quad (3)$$

$$2CO + O_2 + \frac{79}{21} N_2 = 2CO_2 + \frac{79}{21} N_2 + 135\,300 \text{ кал.} \quad (4)$$

¹ Теплота нагрева 1 м³ полугаза — 303 кал.

Реакции (1) и (2) практически идут до конца, реакции (3) и (4) обратимы.

Состав воздушного газа, получаемого по реакции (2):

$$CO = \frac{2}{2 + \frac{79}{21}} \cdot 100 = 34,7\% \text{ и } N_2 = \frac{\frac{79}{21}}{2 + \frac{79}{21}} \cdot 100 = 65,3\%.$$

Теплотворная способность этого газа равна 1050 кал/м³. Равновесие реакции C + CO₂ ⇌ 2CO зависит от давления и температуры. Увеличение давления препятствует образованию окиси углерода, а понижение — способствует. С повышением температуры в равновесной смеси C + CO₂ ⇌ 2CO углекислота переходит в окись углерода, так как идет процесс, связанный с поглощением тепла.

Константа равновесия обратной реакции (3):

$$K_p = \frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}} \quad (5)$$

В табл. 7 приведена зависимость соотношения CO₂ и CO в равновесной смеси газов от температуры.

Таблица 7

Равновесный состав газа

Температура в град.	Смесь CO ₂ и CO в %		Газ, полученный при окислении углерода кислородом воздуха, в %		
	CO ₂	CO	CO ₂	CO	N ₂
500	94,6	5,4	17,1	6,4	76,5
600	76,8	23,2	10,1	18,1	71,8
700	41,3	58,7	3,1	29,4	67,5
800	12,4	87,6	0,6	33,7	65,7
900	2,9	97,1	—	34,7	65,3
1000	0,7	99,3	—	34,7	65,3

Чем выше температура, тем быстрее идет процесс восстановления углекислоты в окись углерода.

Для ускорения процесса газификации большое значение имеет характер топлива и остатка после сухой перегонки. «Молодые» топлива дают значительно более активный остаток, чем «старые». Повышению активности топлива способствует перегонка его при более низких температурах.

С повышением температуры скорость химических реакций растет быстрее, чем скорость диффузии через пограничный слой, и при высоких температурах скорость поверхностных реакций определяется скоростью диффузии газов. Поэтому при очень высоких температурах различие в реакционной способности

кокового остатка различных топлив не имеет столь большого значения для взаимодействия углекислоты с углеродом. Еще сравнительно недавно в газогенераторной технике руководствовались соображениями о медленном восстановлении CO_2 , якобы лимитирующем процесс газификации. Вследствие этого нормы производительности газогенераторов были очень низкими.

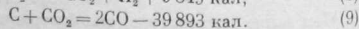
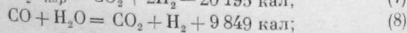
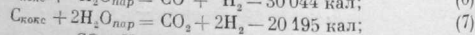
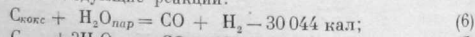
Опытом многочисленных стахановцев-газовщиков, а также работами советских исследователей—М. К. Гроздовского, З. Ф. Чуханова, В. И. Кармазина и др. было доказано, что образование генераторного газа не лимитируется скоростью восстановительных реакций и в результате производительность газогенераторов на всех видах топлива была повышена в 2—3 раза.

Исследования состава газа на разных уровнях газогенератора и в различных условиях показывают, что уже на небольшой высоте газогенератора содержание в газе углекислоты невелико. С повышением температуры, даже при увеличении производительности (т. е. скорости потока), содержание углекислоты на одном и том же уровне уменьшается. При низкой температуре реакционной зоны углекислота восстанавливается менее интенсивно и полученный газ содержит больше углекислоты и меньше окиси углерода.

Исследования и опыт показывают, что для получения газа хорошего состава и достижения высокой производительности газогенератора температура раскаленного слоя должна быть высока, поверхность его достаточно развита и газы должны равномерно и интенсивно обтекать куски раскаленного топлива во избежание окисления CO в CO_2 .

Водяной газ

При подаче в газогенератор водяного пара в реакционной зоне протекают следующие реакции:



Помимо перечисленных реакций при получении водяного газа могут также протекать реакции образования метана.

Взаимодействие углерода с водяным паром идет с поглощением тепла. При высоких температурах протекает преимущественно реакция (6).

Так как реакции (6) и (7) идут с увеличением объема, то повышение давления препятствует разложению водяного пара.

Константа равновесия реакции (8):

$$K_p = \frac{P_{\text{CO}} \cdot P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{CO}_2} \cdot P_{\text{H}_2}} \quad (10)$$

в зависимости от температуры имеет следующие значения

t°	660	800	986	1100	1200	1290	1400	1500
-----------	-----	-----	-----	------	------	------	------	------

K_p	0,372	0,916	1,57	1,972	2,35	2,68	3,076	3,802
-------	-------	-------	------	-------	------	------	-------	-------

В практических условиях каталитического воздействия топлива при температурах выше 900—1000° величина отношения

$$K_{\text{опт}} = \frac{P_{\text{CO}} \cdot P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{CO}_2} \cdot P_{\text{H}_2}} \quad (10)$$

приближается к соответствующему значению константы K_p . При понижении температуры состав полученного газа меняется незначительно вследствие малой скорости реакций.

При получении водяного газа имеют значение факторы температуры и равномерности обтекания газами кусков топлива. Для повышения производительности газогенератора нужно поднимать температуру, чтобы процесс разложения мог протекать достаточно быстро.

Разложение углекислоты, а также водяного пара при получении водяного газа, зависит от реакционной способности топлива.

Водяной газ содержит, главным образом, окись углерода и водород, а также небольшие количества углекислоты, азота и метана.

Так как в процессе получения водяного газа тепло поглощается, то очевидно, что он может протекать непрерывно только в случае постоянного подвода тепла извне. Установки водяного газа работают таким образом, что в один период в газогенератор вдувается пар (газование), а в следующий — воздух (горячее дутье).

При вдувании воздуха углерод топлива сгорает в углекислоту и окись углерода, что сопровождается выделением тепла и повышением температуры. Когда слой топлива достаточно разогреется, подачу воздуха прекращают и в газогенератор начинают вдувать водяной пар. При этом получается водяной газ. Вследствие затраты тепла на получение водяного газа температура слоя топлива постепенно падает, количества разлагающегося пара и получаемого газа уменьшаются. Когда дальнейшее вдувание водяного пара становится невыгодным, его прекращают и в газогенератор вновь подают воздух.

Паровоздушный газ

При получении воздушного газа температура в зоне газификации очень высока, вследствие чего зола топлива плавится, шлак образует комья и обволакивает куски топлива. Это ухудшает распределение дутья в газогенераторе и вызывает прохождение по отдельным каналам воздуха, сжигающего часть газа, а также значительные потери горячего в провале.

Высокая температура воздушного газа обуславливает значительные потери тепла.

Для уменьшения шлакования и повышения теплоотворной способности газа за счет уменьшения его теплоты нагрева к воздушному дутью прибавляют водяной пар. В этом случае наряду с реакциями образования воздушного газа происходят реакции получения водяного газа, что приводит к понижению температуры в зоне газификации.

Теплоотворная способность паровоздушного газа выше, чем чисто воздушного газа, так как в нем содержится больше водорода и окиси углерода за счет уменьшения содержания азота. Таким образом, при получении паровоздушного газа можно понизить температуру зоны газификации по сравнению с разньюющейся при получении воздушного газа и повысить теплоотворную способность газа.

Чем выше температура в зоне газификации, интенсивнее и равномернее обтекание газами кусков топлива и больше поверхность соприкосновения газов и топлива, тем полнее разложение водяного пара и углекислоты, меньше балласта в получаемом газе и выше теплоотворная способность газа и интенсивность газификации. При низкой температуре качество газа ухудшается.

Температура газов при выходе из реакционной зоны для активных топлив (дровяного угля, торфяного и буроугольного кокса) 800—900° и для менее активных — 1000—1100°. Для соответствующего понижения температуры требуется ввести водяной пар в количестве 250—300 г на 1 кг газифицируемого углерода. Чтобы избежать шлакования вследствие легкотплавкости зоны, вводят большие количества водяного пара — 400—600 г на 1 кг газифицируемого углерода. Введение еще большего количества пара вызывает сильное падение температуры в зоне газификации и ухудшение разложения водяного пара и углекислоты. Обычно оно является вынужденным.

На рис. 28 показано изменение состава газа по высоте газогенератора по данным В. И. Кармазина.

Регенеративный газ

Если в качестве дутья подавать в газогенератор углекислоту, она восстанавливается в окись углерода. Действие углекислоты аналогично действию пара. При разложении она образует высококалорийный газ. Процесс протекает с поглощением тепла.

При введении одной углекислоты получается почти чистая окись углерода. Процесс можно вести аналогично процессу получения водяного газа. Углекислоту можно также вводить в виде добавки к кислороду или воздуху. Получающаяся окись углерода обогащает газ.

Углекислота может быть введена в виде отходящих газов печных установок. Преимущество введения отходящих газов



Рис. 28. Изменение состава газа по высоте газогенератора.

взамен водяного пара заключается в возможности использования их тепла нагрева и разложения за счет него некоторого количества углекислоты. Кроме того, при этом не требуется затрачивать топливо на получение пара. Недостатком применения отходящих газов является слишком малое улучшение качества газа вследствие содержания в них азота.

Чем больше содержание азота в отходящих газах печей, тем меньше увеличение тепло-

творной способности газа и тем ниже к. п. д. газогенератора вследствие затраты тепла на нагрев азота.

Целесообразно использовать тепло отходящих газов, содержащих повышенное количество CO_2 и пониженное N_2 (например, отходящих газов известковообжигательных печей).

Атом углерода, взаимодействуя с углекислотой, дает 2 молекулы окиси углерода. При газификации за счет кислорода 2 атома углерода дают 2 молекулы окиси углерода. Таким образом, вводя углекислоту, мы увеличиваем количество получаемой окиси углерода и, следовательно, можем уменьшить количество потребного углерода.

Использование углекислоты возможно только в том случае, если для ее разложения имеется тепло в самом газогенераторе или тепло нагрева вводимых отходящих газов.

Водяной пар, содержащийся в отходящих газах, также полезен, так как в газогенераторе он образует горючий газ.

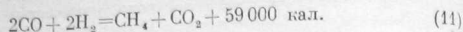
Парокислородный газ

Недостатком обычного способа получения водяного газа является прерывность процесса. Недостаток паровоздушного газа заключается в его низкой теплоотворной способности. При подаче в газогенератор кислородного дутья можно получать непрерывным процессом генераторный газ с высокой теплоотворной способностью вследствие значительного содержания в нем CO .

При газификации с помощью кислорода температура в газогенераторе повышается очень сильно и для ее понижения приходится добавлять много водяного пара. В этом случае газ называется парокислородным.

Увеличение давления смещает равновесие реакций образования генераторных газов в сторону получения молекул, состоящих из большого числа атомов, т. е. таких, образование которых идет с уменьшением объема. Применительно к условиям газо-

генераторного процесса имеет значение увеличение с повышением давления содержания в газе CO_2 и CH_4 при взаимодействии углерода топлива с водородом или различными газами между собой, например:



При этом расширяется область температур, в которой выход CH_4 является высоким, что благоприятствует протеканию газогенераторного процесса.

CO_2 является балластом, однако, его можно легко удалить, промывая водой газ, находящийся под высоким давлением.

При газификации под высоким давлением за счет парокислородного дутья можно получить газ с теплотворной способностью до 4500—5500 кал/м³, считая на очищенный от CO_2 .

Давление в газогенераторе доводят до 20—30 атм. Дальнейшее повышение давления мало увеличивает выход CH_4 .

Расход кислорода понижается с увеличением давления, ввиду развития экзотермических реакций.

Процессы, протекающие в верхней части шахты газогенератора

Топливо, загружаемое в газогенератор, вначале подсушивается, а затем происходит его сухая перегонка. При сухой перегонке из топлива выделяются газообразные и паровые вещества: углекислота, окись углерода, влага, водород, метан, тяжелые углеводороды (главным образом этилен), сероводород, аммиак, пары смол, уксусная кислота и ее томологи, метиловый спирт. Уксусная кислота и метиловый спирт выделяются при сухой перегонке древесины и торфа.

Выделяющиеся продукты сухой перегонки примешиваются к собственно генераторному газу. Благодаря высокой теплотворной способности они повышают его теплотворную способность.

Наличие в продуктах сухой перегонки тех или иных веществ может в значительной мере влиять на свойства и ценность генераторного газа и его обработку.

2. УСТРОЙСТВО ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ

В зависимости от степени механизации обслуживания различают (рис. 29) газогенераторы:

- 1) полумеханические — с механизированным удалением золы и ручной загрузкой топлива;
- 2) механические — с механизированным удалением золы и загрузкой топлива, а также и шуровкой;
- 3) с ручным обслуживанием.

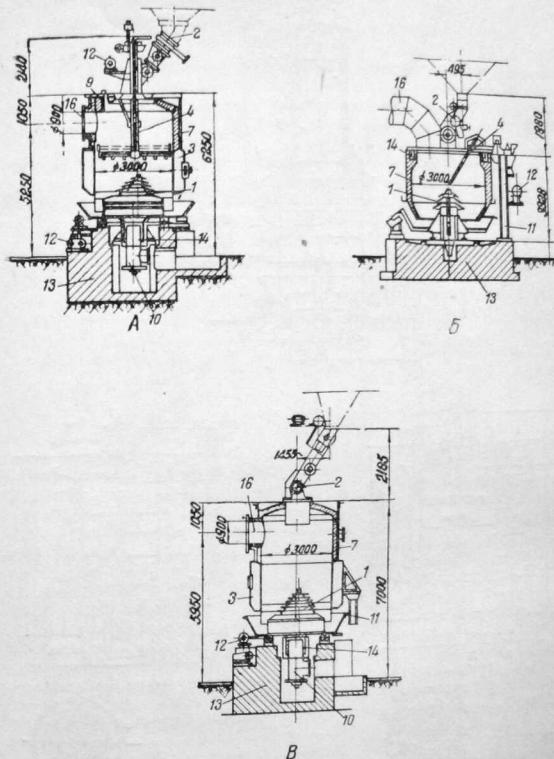
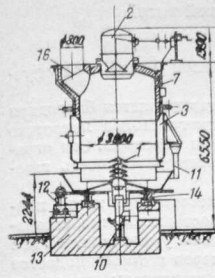
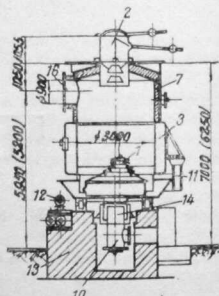
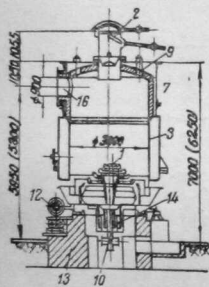
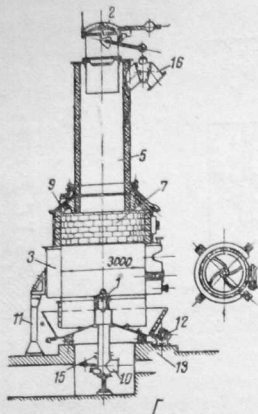
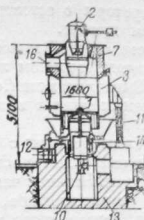


Рис. 29. Схемы газогенераторов.

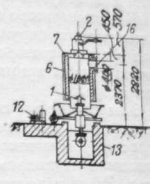
Газогенераторы механические: А — с шуровочной мешалкой, двухбаранным питателем, охлаждающей рубашкой и чешуеобразной решеткой; Б — с шуровочным ломом, двухбаранным питателем и чешуеобразной центральной решеткой; В — с двухбаранным питателем и чешуеобразной решеткой.



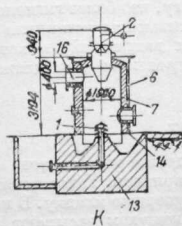
Ж



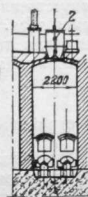
З



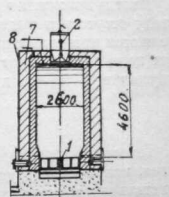
И



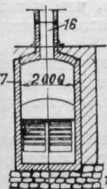
К



Л



И



М

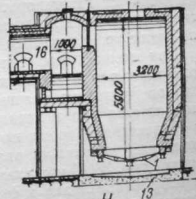
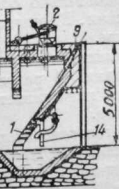


Рис. 29. Газогенераторы полумеханические:

Г—со швелляхтой, охлаждающей рубашкой и центральной фрезерной решеткой; Д—с охлаждающей рубашкой и секционной решеткой; Е—с охлаждающей рубашкой и змееобразной решеткой; Ж—с охлаждающей рубашкой и центральной решеткой; З—с охлаждающей рубашкой и центральной решеткой; И—с центральной решеткой.

К—круглый со стальным кожухом, гидравлическим затвором и круглой решеткой; Л—кирпичный прямоугольный с дугой затвором и ступенчатой решеткой; И—кирпичный с гидравлическим затвором и ступенчатой решеткой; 1—колосниковая решетка; 2—загрузочное приспособление с естественной тягой и горизонтальной рубашкой; 3—охлаждающая рубашка; 4—штуровочное приспособление для соблюдения; 5—швелляхта; 6—кожух; 7—вал; 8—обшивка; 9—твердые; 10—опорный вал; 11—опорный вал; 12—опорный вал; 13—опорный вал; 14—гидравлический затвор; 15—сухой затвор; 16—газоотвод.

Газогенераторы с естественной тягой и искусственным дутьем

Различают газогенераторы с естественной тягой — самодувные и с искусственным дутьем.

В газогенераторе с естественной тягой газ движется благодаря выдавливанию окружающим воздухом легкого столба нагретого газа в газогенераторе. Выдавливающая сила невелика. Это ограничивает виды применяемых топлив и производительность газогенератора.

В настоящее время газогенераторы с естественной тягой применяются редко. Преимущественно распространены газогенераторы с искусственным дутьем. Нижняя часть их уплотнена, и к ней подведен воздухопровод от вентилятора, через который подается дутье. За счет давления, создаваемого вентилятором, преодолевается сопротивление слоя топлива, аппаратуры и трубопроводов, находящихся за газогенераторами.

Иногда применяют искусственную тягу, что более гигиенично, ввиду отсутствия выделения газа. Отсасывающие установки применяются преимущественно для газовых двигателей, в которые газ поступает за счет разрежения, создаваемого при движении поршня в цилиндре двигателя.

Устройство шахт

Газогенераторы, выкладываемые снаружи из красного кирпича, изнутри футеруют огнеупорным кирпичом. Газогенераторы со стальным кожухом имеют только огнеупорную кладку. В целях тепловой изоляции между кладкой и кожухом засыпают слой изоляционного материала (пемзу, шлак, трепел). Толщина кладки в кирпичных газогенераторах значительно больше, чем в газогенераторах со стальными кожухами. Кирпичные газогенераторы снабжают металлическим каркасом.

При высоких температурах, имеющих место в газогенераторе, зола плавится и образуются шлаки. В результате воздействия шлаков футеровка газогенератора изнашивается и, кроме того, уменьшается его полезное сечение.

В настоящее время почти все газогенераторы снабжают сварными или клепаными охлаждающими водяными или пароводяными (рис. 29.А) кожухами-рубашками, которые предупреждают прираивание шлака к футеровке. В водяных кожухах подогревается вода, а в пароводяных — получают пар. Преимуществом водяных кожухов является возможность пользования загрязненной водой, а недостатком — трудность использования тепла воды, а также опасность конденсации паров влаги на внутренней поверхности кожуха и его коррозии. Пар из кожухов легко использовать. Однако при получении пара недостаточно мягкую воду необходимо очищать.

В кожухах и крышках газогенераторов оставляют прикрываемые дверцами и крышками отверстия для проникания в шахты с целью осмотра, растопки и шуровки газогенератора.

Фундамент под газогенераторы делают обычно из бетона и иногда из бутовой кладки.

Кирпичные газогенераторы имеют кирпичные своды, иногда перекрываемые металлическими плитами. Круглые газогенераторы со стальными кожухами обычно имеют кирпичные своды, перекрываемые металлической плитой. Иногда в целях удобства монтажа автоматических загрузочных и шуровочных приспособлений, а также получения водяного пара кирпичные своды заменяют металлическими полыми охлаждаемыми водой крышками или перекрывают ими. Подогретая в крышках вода может быть использована.

Нижняя часть газогенератора с дутьем должна иметь уплотнение для того, чтобы вдуваемый воздух не мог выйти наружу. Уплотнение бывает сухое и гидравлическое. Сухое уплотнение достигается устройством фронтонных плит или же специальных кожухов (см. рис. 30). Гидравлическое уплотнение достигается погружением деталей кожуха (кольца-фартука) в воду (см. рис. 29Г).

В нижней части шахты газогенератора обычно находится зола. В зависимости от характера затвора различают мокрое и сухое золоудаление.

Газогенераторы с разложением смол

Если топливо при нагревании выделяет смолистые вещества, не представляющие особой ценности, и желательно получить бессмольный газ, можно установить газогенератор специальной конструкции, предусматривающей разложение смол. В подобных конструкциях газ, содержащий смолистые вещества, пропускают через зону высоких температур, где они разлагаются. Весьма распространена конструкция газогенератора с обращенным движением газа сверху вниз. Топливо и воздух движутся в прямом направлении сверху вниз и получающийся газ отводится внизу. Смолистые вещества разлагаются при прохождении через раскаленный слой и получается бессмольный газ. Недостатки конструкции заключаются в плохом выжиге остатков и высокой температуре получающегося газа.

Более совершенной конструкцией, применяемой в больших установках, является двухзонный газогенератор, в котором воздух подается сверху и снизу, а газ отводится в середине. Смолистые вещества, выделившиеся в верхней части газогенератора, проходят раскаленный слой и разлагаются. Углерод остатков дожигается за счет воздуха, вдуваемого снизу.

В небольших установках применяют преимущественно перекрываемую конструкцию.

Газогенераторы с получением смол повышенного качества

Для получения смол повышенного качества над основной шахтой газогенератора устанавливают шахту меньшего сечения — швельшахту, в которой происходит сухая перегонка топлива при относительно низкой температуре, и смолистые вещества не разлагаются.

Различают газогенераторы с одним (см. рис. 29Г) и с двумя отъемами газа. Для подсушки и сухой перегонки очень влажного топлива требуется тепло нагрева всего количества газа, получаемого в газогенераторе. В этом случае весь газ пропускают через швельшахту и отводят через верхний отъем. Два отъема газа применяют в том случае, когда через швельшахту нужно пропустить лишь часть газа во избежание сильного повышения температуры сухого топлива и разложения смол. Количество газа, пропускаемого через швельшахту, регулируют с таким расчетом, чтобы газ, отводимый через нижний отъем, не содержал смолистых веществ. При этом температура газа верхнего отъема обычно не превышает 100—120°.

Газогенераторы с двумя отъемами применяют при газификации брикетов бурого и каменного угля.

Газогенераторы для получения водяного газа

Процесс получения водяного газа ведут прерывисто. Обычно работают не с двумя фазами — воздушного и парового дутья, а с большим количеством фаз. При вдувании водяного пара снизу сильнее охлаждается нижняя часть слоя, а верхняя остается горячей. При низкой температуре внизу плохо выгорают остатки. Поэтому для выравнивания температуры слоя и использования тепла нагрева его верхней части пар вдувают также сверху, а получающийся водяной газ отводят снизу (рис. 30). Есть еще несколько промежуточных фаз. Нельзя отводить получаемый газ в сеть водяного газа одновременно с пуском

пара снизу, потому что не занятая топливом часть газогенератора и газопроводы заполнены продуктами воздушного дутья. Для удаления их газ, получающийся при пуске пара, в течение первых нескольких секунд отводит в атмосферу. В первые секунды вдувания воздуха не следует удалять получающийся газ в атмосферу, так как свободная часть газогенератора и газопроводы к началу этой фазы заполнены водяным газом. Поэтому, лишь через некоторое время после пуска воздуха получаемый газ можно отводить в атмосферу.

Очень трудно разделить процессы воздушного и парового дутья так, чтобы получаемые газы совершенно не смешивались. Поэтому водяной газ обычно содержит некоторое количество азота из продуктов воздушного дутья, а продукты воздушного дутья — некоторое количество водяного газа.

Продукты воздушного дутья уносят из газогенератора много тепла, которое используется для повышения к. п. д. установки, преимущественно в котлах-утилизаторах и для перегрева пара и карбюрации газа.

Управление клапанами в газогенераторах водяного газа чрезвычайно сложно. В течение нескольких минут их приходится многократно переключать. Во избежание ошибок и аварий клапаны обычно блокируют между собой с таким расчетом, чтобы они открывались и закрывались в определенной последовательности. Небольшие установки водяного газа снабжают специальными лебедками или рычагами для перестановки клапанов.

Большинство современных установок водяного газа средних и больших размеров снабжают приспособлениями для автоматического управления задвижками газогенераторов. Эти приспособления состоят из аппарата, в определенной последовательности подающего масло или воду под давлением в цилиндры, непосредственно переставляющие задвижки.

Водяной газ получают преимущественно из топлив, содержащих мало летучих, т. е. из антрацита и кокса. Применение топлив с высоким содержанием летучих нецелесообразно, так как они частично теряются в период воздушного дутья. Это понижает к. п. д. установок. Водяной газ из топлив с высоким содержанием летучих получают в специальных газогенераторах, в которых эти летучие разлагаются. Невозможность при таких газогенераторах улавливания смолистых веществ во избежание обусловили применение газогенераторов двойного газа.

Газогенераторы для получения двойного водяного газа

Газогенераторы для получения двойного водяного газа снабжают швельшахтами. В период воздушного дутья получаемые газы отводят у основания швельшахты и, следовательно, они не уносят большого количества продуктов сухой перегонки. В период

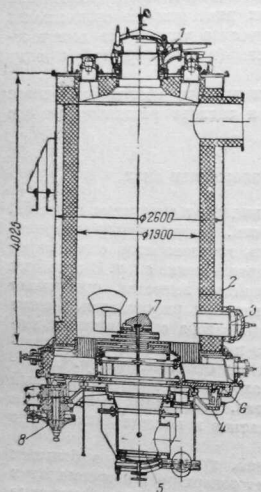


Рис. 30. Газогенератор для получения водяного газа:

- 1 — крышка с затравочным люком;
- 2 — корпус газогенератора;
- 3 — дверь;
- 4 — нижний кожух;
- 5 — затвор;
- 6 — поддон;
- 7 — поливочная сетка;
- 8 — привод воздуходувки.

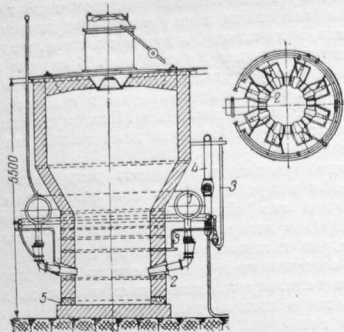


Рис. 31. Газогенератор с выпуском жидкого шлака:

1—воздухопровод; 2—охлаждаемые водой фурмы;
3—паропровод; 4—водопровод; 5—отверстия для
выпуска жидкого шлака и чугуна.

парового дутья водяной газ проходит шпельшахту и, смешавшись с продуктами сухой перегонки, отводится у верха шпельшахты.

Название «двойной» этот газ получил потому, что он представляет собой смесь двух газов: водяного газа и газа сухой перегонки. Теплоотвратная способность этого газа выше, чем водяного, так как к нему примешаны продукты сухой перегонки. Из него можно улавливать смолистые вещества.

Газогенераторы с выпуском жидкого шлака

В нижней части газогенераторов с выпуском жидкого шлака поддерживают столь высокие температуры, что зола находится в расплавленном состоянии и может быть выщущена в жидком виде (рис. 31).

Для понижения температуры плавления золы к топливу добавляют флюсы. В качестве флюса обычно применяют доменный шлак, бешые железом руды и известняк.

Газогенераторы с выпуском жидкого шлака обладают рядом достоинств. В них можно газифицировать топлива с легкоплавкой золой, непригодные или мало пригодные для газификации в обычных газогенераторах. Они имеют очень высокую производительность, что обуславливается возможностью поддерживать высокую температуру в нижней части газогенератора и, следовательно, большей скоростью реакций.

Газогенераторы с выпуском жидкого шлака могут работать на чисто воздушном дутье. Это имеет значение для химической промышленности, где иногда необходим газ с малым содержанием водорода.

Одновременно с генераторным процессом в газогенераторе с жидким шлакоудалением можно вести доменный процесс, в результате которого получаются качественные чугуны и цветные металлы. Чугун выплавляется из золы и из добавок. Цветные металлы выплавляются или возгоняются и улавливаются из газа.

При жидком шлакоудалении можно использовать не только металл, но и шлак, получающийся в жидком виде. Шлак можно использовать в цементной промышленности, для строительных и других целей. Вследствие связывания сернистых соединений и серы добавками к топливу и расплавленными металлами, получаемый газ содержит мало сернистых соединений и не требует очистки от серы.

Не все топлива одинаково пригодны для газификации в газогенераторах с жидким золоудалением. Топлива, легко распадающиеся при нагревании или под нагрузкой, засоряют газогенератор и препятствуют вытеканию шлака. Чтобы можно было использовать легко распадающиеся сорта топлива, их следует брикетировать.

Подземная газификация угля

Огромный интерес представляют вопросы подземной газификации. Идея подземной газификации, предложенная великим русским ученым Д. И. Менделеевым, открывает замечательные перспективы — дает возможность избежать затраты труда и средств на разработку земных недр, выдоху угля на поверхность, его обогащение и подготовку. Кроме того, газификация угля в пластах позволяет использовать маломощные пласты толщиной менее 0,5 м, разработка которых обычным путем нерентабельна. Подземная газификация впервые была осуществлена в СССР. Д. И. Менделеев писал (1888 г.), что «настанет, вероятно, со временем даже такая эпоха, что угля из земли вынимать не будут, и там, в земле, его сумеют превращать в горючие газы и их по трубам будут распределять на далекие расстояния».

В. И. Ленин указал в отношении метода подземной газификации: «Одна из великих задач современной техники близится, таким образом, к разрешению».

Первоначально были опробованы методы газификации с разрыхлением пласта. Они оказались невыгодными.

При подземной газификации в целике в настоящее время используют методы, основанные на взаимодействии потока газов с углеродом при протекании их вдоль сплошной поверхности нераздробленного угля или при фильтрации газов через целик. Подобные методы, если они не требуют значительных горных работ и проходки шахт, называют бесшахтными.

По методу Донецкого углехимического института процесс газификации пеллика ведется без предварительной подготовки его. Дутье подается в канал внизу панели, пройденной в пеллике в направлении его простирания. В этом канале газ взаимодействует с топливом и получается генераторный газ.

По бесшахтному фильтрационному методу работает подмосковная станция подземной газификации. В дутьевую скважину подается воздух, проходящий через толщу пласта угля. Получаемый газ отводится через газовую скважину, расположенную на некотором расстоянии от дутьевой. При нагреве пласт растрескивается. По этой причине, а также вследствие дождики и сухой перегонки угля, газопроницаемость пласта через некоторый промежуток времени после розжига становится значительной.

Работающая с 1938 г. подмосковная станция подземной газификации дает газ состава: CO_2 —14—16%; CO —8—10%; CH_4 —1%; H_2 —17—20%; H_2S —2%; N_2 —50—58% Q_n —900 кал/м³. Газом отапливаются паровые котлы.

Колосниковые решетки газогенераторов

Колосниковые решетки газогенераторов поддерживают слой топлива, распределяют дутье по сечению газогенератора, способствуют удалению золы или сами удаляют золу и шлак. В зависимости от конструкции решетки различают:

- 1) газогенераторы с неподвижными решетками и
- 2) газогенераторы с вращающимися (механическими) решетками.

Газогенераторы с неподвижными решетками

Из неподвижных решеток распространены: горизонтальные, ступенчатые, крышеобразные и др.

Газогенераторы со ступенчатыми решетками (рис. 29М) могут быть применены для топлива со шлакующей золой, а также мелкого, так как оно не просыпается через прозоры колосников. Разламывание шлака осуществляется шуровкой ломом через прозоры решетки.

Газогенераторы с горизонтальной и ступенчатой решетками часто делают прямоугольные и целиком кирпичные.

Газогенераторы с неподвижной решеткой дешевы, просты в обслуживании и применяются при необходимости в небольшой производительности. Наилучшими являются круглые газогенераторы с решеткой в виде чепца и с гидравлическим затвором.

Газогенераторы с вращающимися решетками

При механическом удалении золы в нижней части газогенератора устанавливают вращающийся поддон, на котором лежит слой топлива и помещается колосниковая решетка. К поддону

прикреплен кольцевой борт высотой до 750 мм, образующий чашу. В чаше находится гребок (нож, лемех), прикрепленный к неподвижному кожуху. При вращении чаши зола и шлак набегает на гребок и выбрасывается наружу, а на их место поступают новые порции.

Газогенераторы с вращающейся решеткой допускают непрерывное удаление золы и шлака, обеспечивают более равномерный процесс газификации и при надлежащей конструкции решетки—хорошее распределение дутья по сечению. Они дают хорошие показатели в отношении к. п. д., качества газа, производительности и выжка остатков.

Существует очень много конструкций колосниковых решеток. В основном решетки состоят из основания, колосников и головок, стягиваемых болтами. Решетки можно разделить на две группы: с центральной подачей дутья (центральные) и с равномерным распределением дутья по сечению.

В решетках более старых конструкций предусмотрена равномерная подача дутья по сечению. Они имеют большие размеры, и дутье подается на большую площадь. Для лучшего проталкивания и разрушения шлака такие решетки делают эксцентричными, или же снабжают ребрами и выступающими частями. Ломка кусков шлака осуществляется, главным образом, основанием решетки о фартук.

Особенностью чашеобразной решетки (см. рис. 29Е) является форма колосников, вызывающая шевеление слоя при вращении решетки, и расположение направляющих дутье щелей в сторону, противоположную вращению решетки во избежание засорения их золой.

Центральные решетки устроены так, чтобы дутье подавалось только в части, представляющей наибольшее сопротивление движению газов, т. е. в середине газогенератора. В секционной решетке (рис. 29Д) дутье подается отдельно в средней и в периферийной частях решетки. Давление дутья и содержание в нем пара можно регулировать самостоятельно.

Применяющиеся в настоящее время решетки с центральной подачей дутья имеют, в основном, небольшие размеры. Корма шлака разрушаются с помощью винтообразных выступов, которыми снабжают решетку или поддон.

В газогенераторах с центральной решеткой большого диаметра в случае применения мелкого топлива, представляющего собой большое сопротивление, наблюдается недостаточный подвод дутья к периферии.

Из числа центральных решеток в СССР получили распространение фрезерные решетки (рис. 29Г). Такая решетка имеет симметричную форму и состоит из головки и круглых кольцевых колосников малого диаметра, расположенных по оси газогенератора. Поддон чаши снабжен винтообразными ребрами-приливами, подрезающими и удаляющими золу и шлак равномерно

по сечению. Эти же ребра раздавливают золу и шлак о фар-
тук.

Вращающиеся решетки снабжают гидравлическими и сухими
затворами. Высота гидравлического затвора выбирается в соот-
ветствии с давлением дутья под решеткой (250—450 мм вод. ст.).

Расстояние между фартуком и поддоном чаши определяет
максимальный размер кусков шлака, проходящего через образу-
ющуюся щель и составляет 250—300 мм.

Чаша вращается от червячного привода, соединенного с инди-
видуальным мотором или трансмиссией. Мощность электродвига-
теля для привода решетки газогенераторов диаметром 1,5; 2,0;
2,5; 3,0 и 3,6 м составляет соответственно: 2; 2,1; 2,25; 2,5 и 2,85 кит.

Предусматривается возможность изменения скорости враще-
ния чаши в пределах 0,17—1,0 об/с.

Гидравлический затвор осуществляется заполнением водой
чаши, образованной поддоном и бортами, в которую погружается
фартук. Борты чаши обычно состоят из отдельных сегментов,
которые соединяются болтами с применением асбестовых про-
кладок.

Если необходимо работать с дутьем высокого давления,
делают сухой затвор с помощью кожуха, на основании которого
монтируют ролики. На роликах вращается поддон. Зола и шлак
сбрасываются с вращающегося поддона в зольный карман
(рис. 30). Применение сухого затвора может быть вызвано также
высокими температурами.

Вращающаяся чаша опирается на шары или ролики. Привод
чаши осуществляется с помощью червяка и червячного венца,
закрепленного на поддоне чаши.

Загрузочные приспособления

Газогенераторы старых конструкций снабжали загрузочными
приспособлениями с одним клапаном. При загрузке топлива
такой газогенератор сообщается с атмосферой, вследствие чего
происходит выделение газа наружу или засасывание воздуха
в шахту. Такие загрузочные приспособления применяют только
в небольших газогенераторах водяного газа. Загрузочные отве-
рстия перекрывают плотным люком, открываемым лишь при
выключении дутья. Загрузка производится редко, и режим про-
цесса сильно меняется.

Загрузочная коробка с двумя клапанами показана на рис. 32.
Топливо загружают в коробку при открытом верхнем и закрытом
нижнем клапане, разобщающем газогенератор от атмосферы.
После засыпки порции топлива в коробку закрывают верхний
клапан и опускают нижний. В этом положении коробка сооб-
щается с газогенератором и разобщена от атмосферы.

Для регулирования количества топлива, подаваемого к сере-
дине и периферии шахты, нижние клапаны изготовляют в виде

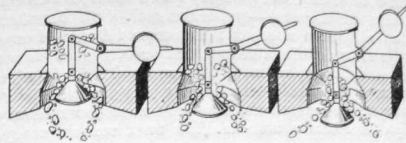


Рис. 32. Распределение топлива в зависимости от положения
конуса.

конусов и комбинируют с отражающими поверхностями. В зави-
сности от степени опускания конуса топливо падает ближе
к стенкам или к середине. Необходимость такого распределения
топлива вызывается тем, что более крупные куски обычно отката-
ются к стенкам, а мелкие остаются у середины. Так как такая
конструкция клапана не дает достаточно хорошего распределения
топлива по сечению, предложено разделять конус, распределяю-
щий топливо, на две части: внешнюю кольцевую и внутреннюю.
При опускании внутренней части конуса топливо попадает в сере-
дину шахты, а при опускании обеих частей конуса — к периферии.
В силу большой сложности обслуживания подобные устройства
особого распространения не получили.

Загрузочные приспособления для дровяного топлива в соот-
ветствии с формой поленьев делают прямоугольными, а нижние
клапаны (языки) — плоскими. Верхний клапан в таких коробках
обычно имеет гидравлический затвор.

При наличии ручных загрузочных приспособлений топливо
засыпается в газогенератор периодически, причем режим его
работы меняется. После загрузки топлива увеличивается содер-
жание в газе влаги и затем летучих веществ. Через некоторое
время становится заметным увеличение содержания окиси угле-
рода, после чего газогенератор начинает прогорать, и в газе
появляется значительное количество угольной кислоты. При больших
промежутках между загрузками колебания в составе газа значи-
тельны. Эти обстоятельства побуждают к возможно более частому
питанию газогенератора.

Непрерывность загрузки топлива и уменьшение количества
обслуживающего персонала достигаются применением механиче-
ского устройства для питания газогенераторов. В основном эти
устройства состоят из вращающегося барабана, в верхнее отделение
питателя входят вращающиеся валики, высыпающиеся в газо-
генератор из бункера поступает топливо, высыпающееся в газо-
генератор при повороте барабана. Перегородки барабана хорошо
подгоняют к кожуху для уменьшения выделения газа.

На рис. 29А показан механический питатель Гипрогазотоп-
рома для антрацита, кокса и каменных углей.

Верхний барабан (дозировщик) имеет четыре полости. Нижний барабан (порционер) — уплотняющий. Оба барабана приводятся во вращение мотором мощностью 1,8 квт. Число оборотов дозирующего барабана изменяется от 0,19 до 1,33 в минуту. Производительность порционера составляет $0,6 \div 4,15$ м³/час.

Питатели с барабаном непригодны для древесины и торфа, куски которых не раздавливаются при попадании между кромками ребра барабана и кожуха. Для этих топлив следует применять специальные автоматические питатели, например, с клапанами в виде конусов, автоматически открывающих и закрывающих отверстия.

В установках водяного газа, работающих под большим давлением, при механическом питании применяют специальные вспомогательные бункеры, вмещающие 1,5—2-часовой запас топлива и соединяющиеся с автоматическими питателями, которые подают топливо в газогенераторы. Вспомогательные бункеры герметически отключены, и газ не просачивается. При необходимости загрузки бункера специальный клапан герметически отключает механической питательное приспособление, и в то же время открывается бункер для приема соответствующей порции топлива. Для возможного меньшего дробления топлива применяют питатели с качающейся плитой, вращающимся столом и т. д.

Механические шуровочные приспособления

Для процесса газификации большое значение имеет равномерное распределение топлива по сечению шахты, однородности размера кусков и легкая пронизываемость слоя газами. Наилучшим образом это достигается при механической шуровке.

Для этой цели служат механические шуровочные приспособления, которые обычно комбинируют с механическими питателями. Постоянная и одинаковая высота слоя топлива чрезвычайно способствует равномерности режима. В газогенераторах, снабженных подобными приспособлениями, можно сильно интенсифицировать процесс, получая газ высокого качества.

Механические шуровочные приспособления применяют преимущественно для спекающихся топлив, т. е. для отдельных сортов каменного угля. Для равномерного распределения топлива по сечению и выравнивания слоя в газогенераторах большого диаметра иногда применяют механические шуровочные приспособления и при неспекающихся топливах. Не следует применять сильно шуровочные приспособления для легко разрушающихся топлив, например, бурых углей.

Из механических шуровочных приспособлений наибольшее распространение имеют мешалка и лом, применяемый одновременно с вращающейся шахтой.

Мешалка (рис. 29А) представляет собой вращающиеся грабли, расположенные по оси шахты. Грабли состоят из вертикального

и горизонтального стержня, снабженного отрезками. Горизонтальный стержень находится у самой поверхности топлива и выравнивает слой. Отрезки, направленные вниз и вперед, в сторону вращения, погружены в слой топлива на глубину 250—350 мм и при вращении мешалки бороздят его, предупреждая спекание.

Глубину погружения мешалки в слой можно менять, увеличивая или уменьшая груз, помещенный на мешалку. Во избежание перегрузки и поломки мешалки вертикальный стержень имеет в верхней части винтовую резьбу и может перемещаться в вертикальном направлении во втулке шестерни, приводящей его во вращение. При значительном увеличении сопротивления, например, вследствие повышения слоя топлива, мешалка автоматически поднимается, а при снижении слоя — опускается. Величина вертикального перемещения составляет 500—600 мм. Во избежание прогара мешалку охлаждают водой. Расход воды составляет 2—3 м³/час. Мешалка делает примерно 7—12 об/час. Она может быть приспособлена и к существующим газогенераторам.

Автоматический шуровочный лом расположен эксцентрично и описывает колебательные движения. Одновременно вращается шахта. Комбинированное движение шахты и лома обуславливает ворошение слоя на значительной высоте (рис. 29Б).

Помимо автоматических шуровочных приспособлений, применяют простые штанги, используемые при работе на всех топливах. Штанги направляют в любой участок слоя и вталкивают в него с помощью механического, пневматического или электрического приспособления. При отсутствии последних шуровка ведется вручную.

Приспособления, предупреждающие выбивание газа

При обслуживании газогенератора открывают отверстия в крышке, откуда выбивает струя газа, отравляющего воздух в рабочем помещении и препятствующего работе.

В целях борьбы с выделением газа устанавливают затворы, перебивающие струю газа струей пара или воздуха, подаваемой в шуровочное отверстие через узкую щель шириной приблизительно 0,5 мм под давлением 4—6 атм. Для этой же цели предусматривают подачу пара более низкого давления у загрузочного сматривают подачу пара более низкого давления у загрузочного конуса и в загрузочную коробку. Открыв верхний клапан, включают паровую завесу у конуса, которая препятствует выделению пара через неплотности у конуса. После того как топливо завесу жено и верхний клапан закрыт, выключают паровую завесу у конуса и включают подачу пара в коробку. Последняя заполняется паром, и в это время опускают конус. Пар препятствует поступлению газа в коробку, и при последующем подъеме верхнего клапана газ не выделяется в помещение.

К генераторному газу предъявляют определенные требования в отношении содержания загрязнений и отдельных компонентов. Может потребоваться удаление из газа и улавливание взвешенных частиц (пыли, сажи, конденсированных смолистых веществ и влаги) и паро- и газообразных составляющих (сероводорода, аммиака, уксусной кислоты и др.).

Необходимость очистки газа от взвешенных частиц и парообразных примесей вызывается затруднениями, обусловленными засорением и разбедением газопроводов или желанием уловить ценные побочные продукты: смолы, уксусную кислоту, аммиак и др. Иногда очистки газа требует потребитель.

Удаление из газа водяного пара путем его охлаждения вызывается необходимостью повысить пирометрический эффект горения газа и уменьшить потери с отходящими газами.

Сероводород улавливают из газа преимущественно вследствие его вредности для обрабатываемого материала (например, стекла) и здоровья обслуживающего персонала.

Сухая очистка газа

Под сухой очисткой понимают удаление из газа взвешенных частиц посредством сухих пылеуловителей. Сухой также называют очистку газа от сероводорода при взаимодействии его с твердыми веществами.

Сухой очисткой газа ограничиваются в тех случаях, когда температура газа высока (газ из каменных углей, антрацита и кокса) и желательно использовать в печной установке его тепло нагрева и потенциальное тепло смол, а также при отсутствии особых требований потребителя к чистоте газа. В случае сухой очистки газа газогенератор устанавливают возможно ближе к установке, потребляющей газ. Газ поступает в установку почти в таком же состоянии, в каком он выходит из газогенератора: он только несколько охлаждается и из него удаляется некоторая часть взвешенных частиц. При сухой очистке газа приходится периодически чистить газоходы от осевших в них пыли, сажи и смолы.

Сухая очистка газа позволяет избежать установки аппаратуры для улавливания смолистых веществ и осушки газа и получения загрязненных и трудно очищаемых сточных вод.

Смолы начинают выделяться при охлаждении газа ниже 400°. Если температура газа достаточно высока, смолы целиком или большей частью находятся в парообразном состоянии.

При сухой очистке газа у газогенераторов устанавливают сухие пылеуловители. Схема движения газов в этом случае следующая: газогенератор—пылеуловитель—коллектор—газопровод к потребителю. Так как пылеуловители недостаточно хорошо очищают

газ, вследствие чего взвешенные частицы продолжают выпадать по пути его движения, то коллектор и газопроводы снабжают пылевыми мешками в тех местах, где можно ожидать значительного выпадения пыли.

Сухой пылеуловитель представляет собой камеру, состоящую из стального кожуха толщиной 6—10 мм, футерованного в $1/4$ — $1/2$ огнеупорного кирпича. В камере устраивают лазы для проникновения внутрь и иногда 2—3 шуровочных отверстия с паровой завесой для шуровки настелей. Для выпуска пыли в нижней части пылеуловителя находится клапан в виде конуса, прижимаемого к седлу рычагом с противовесом. Рекомендуется устроить оросительный кольцевой водопровод для смачивания пыли в момент ее выгрузки через нижний затвор.

На рис. 33 приведена схема установки с сухой очисткой газа.

Мокрая очистка газа

Мокрая очистка газа более эффективна, чем сухая. Она сопрягается промывкой, а следовательно, и охлаждением газа. При промывке из газа выделяются твердые взвешенные частицы и конденсируются составные части. В некотором количестве в промывной жидкости растворяются и парообразные составные части. Путем орошения специальными реагентами из газа можно уловить отдельные газообразные составляющие.

Мокрую очистку обычно применяют для более полной очистки газа от взвешенных частиц, а также в целях осушки газа и извлечения парообразных и газообразных составляющих: смол, уксусной кислоты, аммиака и сероводорода. Мокрую очистку газа часто комбинируют с установкой специальных аппаратов для улавливания смолы и пыли.

Газ, освобожденный при помощи мокрой очистки от пыли, сажи, смолы и влаги, можно транспортировать под большим давлением по разветвленным газопроводам малых сечений с хоро-

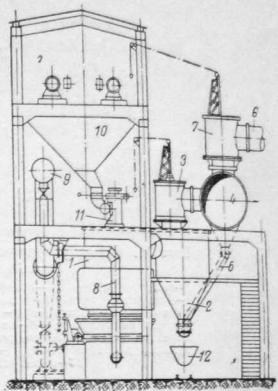


Рис. 33. Схема установки с сухой очисткой газа:

- 1—газогенератор; 2—пылеуловитель; 3—тарельчатый затвор; 4—рукав для пыли; 5—газопровод к потребителю; 6—тарельчатый затвор; 7—воздухопровод (ответвление к газогенератору); 8—воздушная магистраль; 9—бункер; 10—питатель; 11—вагонетка для пыли и смолы.

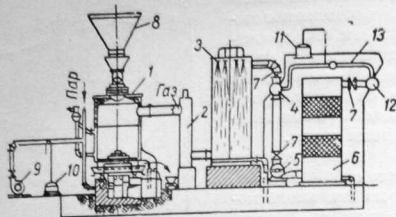


Рис. 34. Схема установки с мокрой очисткой бессмолистого газа:

1—газогенератор; 2—стонк-охладитель; 3—скруббер; 4—дозатор газа; 5—газовый вентилятор; 6—каплеуловитель; 7—завязки; 8—бункер для топлива; 9—воздушный вентилятор; 10—автоматический регулятор количества подаваемого воздуха; 11—автоматический регулятор давления газа; 12—газопровод к потребителю; 13—обводной газопровод.

шей и удобной регулировкой и с установкой счетчиков. Хорошая очистка позволяет использовать для обогрева печей лучшие конструкции горелок, централизовать топливное хозяйство и отказаться от установок индивидуальных станций у отдельных потребителей. Хорошо очищенный газ пригоден для питания газодвигателей.

Необходимость улавливания паровых и газообразных составляющих иногда вынуждает применять мокрую очистку газа, значительно осложняющую газогенераторную установку. Так, в некоторых производствах силикатной промышленности нельзя применять генераторный газ, содержащий сероводород. Очистке от сероводорода подвергается газ, предварительно охлажденный и освобожденный от смолистых веществ. Поэтому для удаления сероводорода газ подвергают мокрой очистке, даже если она невыгодна и нецелесообразна с точки зрения экономии топлива.

Мокрая очистка от пыли бессмолистого газа сравнительно проста. Она производится в стонке-охладителе и в скруббере (рис. 34). Стояк-охладитель является переходным газопроводом, используемым для охлаждения газа до 150—200°. Его наличие не обязательно. Скрубберы заполняют насадкой из керамических колец, кокса или деревянных хорд, создающих большую поверхность охлаждения. Иногда взамен применения насадкой мелко распыляют воду. В скруббере газ очищают охлаждают и сушат. Сушка обусловлена уменьшением давления насыщенного водяного пара при понижении температуры до 30—35°. Устанавливаемый за газовым вентилятором каплеуловитель, заполненный насадкой, улавливает капли влаги, несенные из скруббера и частично укрупнившиеся в вентиляторе.

Обычно схема движения газа следующая: газогенератор—стояк—скруббер—колектор—газовый вентилятор—каплеуловитель—газопровод к потребителю. Содержание пыли в очищенном газе составляет 0,5—1,0 г/м³.

При необходимости тонкой очистки газа помимо скрубберов устанавливают специальные очистные аппараты, обычно используемые при улавливании смол (см. ниже).

При очистке смолистого газа с улавливанием смол за стояками-охладителями устанавливают дезинтеграторы или электрофильтры. В стояках температура газа снижается до 80—90°, уменьшается его объем и увеличивается количество сконденсировавшихся смолистых веществ. Однако температура не должна снижаться ниже указанных пределов, так как температура газа должна быть выше точки росы по влаге для того, чтобы влага не выделялась одновременно со смолой. После смолоулавливания схема очистки совпадает с рассмотренной для бессмолистого газа.

Если смолы улавливаются дезинтеграторами, повышающими давление газа и заменяющими газовые вентиляторы, газ поступает в каплеуловители, затем в скруббер для осушки и к потребителю. Если установлен электрофильтр, газ направляется в скруббер и далее в газовый вентилятор и каплеуловитель. Можно устанавливать газовый вентилятор и до смолоуловителя. Смолу из смолоуловителей собирают в специальный резервуар.

В больших установках с мокрой очисткой газа в целях экономии воды и уменьшения сброса загрязненных вод последние замыкают в цикл. Вода, стекающая от стояков-охладителей и скрубберов, после очистки подается насосами первого подъема на градирню или в брызгальный бассейн для охлаждения, откуда насосами второго подъема подается вновь в стонки и скрубберы.

Сточные воды в установках с улавливанием смол загрязнены фенолами и не могут быть спущены в водоем. Это также является причиной организации непрерывного цикла промывных вод. Промывные воды из стояков, скрубберов, вентиляторов и каплеуловителей собирают в смолоустойчивый резервуар (аму), где улавливаются осевшая тяжелая смола и всплывшие легкие масла.

Ввиду вредности воды выделявшегося из газа конденсата, за вышедший количество выделившегося из газа конденсата, за вычетом испарившейся на градирне воды. Для этой цели воздух, подаваемый в газогенераторы, орошают промывной водой, улавливая его. Кроме того, подсушивают газифицируемое топливо. Сбрашиваемые воды подвергают очистке от фенолов, которая сложна и недостаточно освоена. При обработке уксусной кислотой и аммиак. Возможно их улавливание и в газовой фазе.

Для влажных топлив (древесина, торф, влажные сорта бурого угля) баланс охлаждающих вод положительный, т. е. количество выделившегося из газа конденсата превышает количество влаги, испаряемое на градирне. Следовательно, требуется постоянно

отводить некоторое количество сточных вод. При сухих топливах, наоборот, необходимо постоянно добавлять воду в систему охлаждающих вод.

При необходимости тонкой очистки газа после промывки проходит дополнительно специальные очистители — электрофильтры, дезинтеграторы, фильтры с различными наполнителями.

При мокрой очистке можно использовать тепло нагрева газа для получения пара. При газификации бессмольного топлива для этой цели можно установить котлы-утилизаторы, при смолистом — устройства, в которых воздух, подаваемый в газогенератор, увлажняется путем орошения охлаждающей водой из скрубберов.

В установках водяного газа этот вопрос имеет большее значение, чем в установках паровоздушного или воздушного газа, так как использование теряющегося тепла может повысить их к. п. д. иногда почти на 20%. Для использования тепла газов воздушного дутья и тепла нагрева водяного газа устанавливают котлы-утилизаторы, пароперегреватели и испарители.

На рис. 35 показана установка с очисткой смолистого газа.

Действие дезинтеграторов (рис. 36) основано на выпадении частиц под влиянием удара или центробежной силы, а электрофильтров (рис. 37) — на выпадении частиц под действием электрического тока.

Вал 1 дезинтегратора приводит в быстрое вращение диск 2 с лопатками 3. По газопроводу в аппарат подается газ, а по трубам 5 — промывная жидкость (обычно смола), разбрызгиваемая дырчатым вращающимся конусом 6. Помимо лопаток, вращающихся с диском 2, имеются неподвижные лопатки 4, прикреплённые к кожуху. Лопатки расположены по concentрическим окружностям. Конус 6 и вращающиеся лопатки 3 разбивают частицы промывной жидкости на мельчайшие капли, сталкивающиеся с частичками смолы в газе и укрупняющиеся. При ударе о неподвижные лопатки 4 частицы смолы также укрупняются, стекают с них и вновь подвергаются действию вращающихся лопаток. В конечном счёте крупные капли смолы, в основном, оседают на корпусе аппарата и стекают с него, а частично уносятся с газом и оседают в кашлеуловителе.

Лопастки 9 нагнетают газ, и поэтому аппарат является не только смолоотделителем, но и вентилятором. Подшипники снабжены водяным охлаждением. Вода подается по трубе 20. Привод аппарата — от мотора 21.

Дезинтеграторы просты по устройству, надежны в работе, недороги и занимают небольшую площадь. Степень очистки достигает 95%. Недостатком их является большое потребление энергии — порядка 3,5–6 квтч на 1000 м³ газа, включая расход на повышение давления газа, что имеет значение в больших установках. Для небольших установок эти аппараты являются наилучшими.

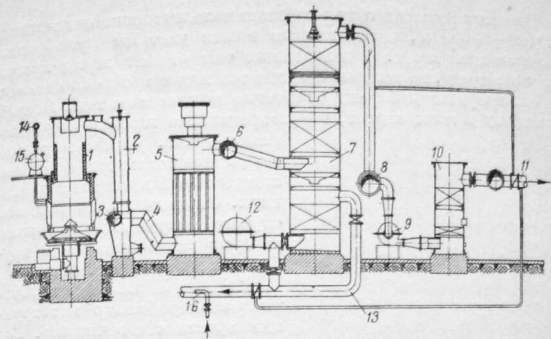


Рис. 35. Схема установки с мокрой очисткой смолистого газа:

1—газогенератор; 2—стойки; 3—коллектор сырого газа; 4—газопровод и электромотор; 5—электромотор; 6—газопровод и скрубберы; 7—трехступенчатый фильтр; 8—коллектор очищенного «холодного» газа; 9—газовый вентилятор; 10—купеуловитель; 11—газопровод и потребители; 12—воздушный вентилятор; 13—воздухопровод и газогенератор; 14—паровая магистраль низкого давления; 15—паросборник; 16—паровое сопло.

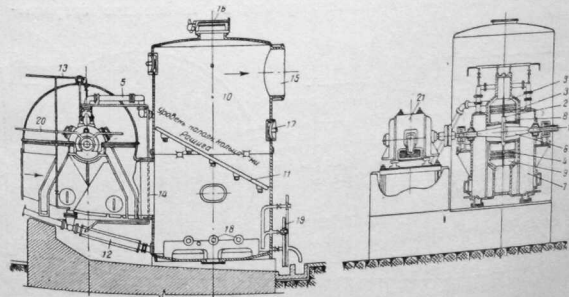


Рис. 36. Дезинтегратор:

1—вал; 2—диск; 3—лопатки, прикреплённые к диску; 4—лопатки, прикреплённые к кожуху; 5—подвод промывной жидкости; 6—конус для разбрызгивания промывной жидкости; 7—вход газа; 8—конус; 9—лопатки для выравнивания промывной жидкости; 10—оливная решетка для масляных керосиновых колец; 11—трубодоводный вентиль; 12—отводная решетка для масляных керосиновых колец; 13—отвод газа из дезинтегратора; 14—отвод смолы; 15—подвод пара для нагрева смолы; 16—отвод газа из кашлеуловителя; 17—диск; 18—паровые подогреватели; 19—слив смолы; 20—подвод воды в подшипники; 21—мотор.

В электрофильтрах газ проходит в поле высокого напряжения (50 000—60 000 в), и взвешенные в нем частицы приобретают электрический заряд. В дальнейшем они отдают заряд пассивному электроду, на котором осаждаются или с которого стекают.

Электрофильтры бывают трубчатые и пластинчатые. Последние проще в изготовлении, но распределение газов в них менее равномерное. Трубы или пластины представляют собой положительный полюс и заземляются. Отрицательным полюсом служат излучающие провода, которые располагаются в трубах или между пластинами.

На рис. 37 показан трубчатый электрофильтр конструкции греста «Азеохистка». Газ входит через штуцер 1, проходит насадку 4 и поднимается по трубам 2. Электрический ток высокого напряжения проходит через раму 7 и коронирующие электроды 6 из тонкой проволоки, расположенные по оси труб. Коронирующие электроды 6 и рамы 7 и 8 подвешены на изоляторах, заключенных в кожробки во избежание загрязнения



Рис. 37. Электрофильтр.

1—подвод газа; 2—трубы; 3—отвод газа; 4—насадка для распределения газа по сечению; 5—трубная плата (перегородка); 6—коронирующие электроды; 7—верхняя рама; 8—нижняя рама; 9—грузы, натягивающие проволоку; 10—стержни для подвески подвески коронирующей системы; 11—шток для подвески коронирующей системы; 12—изоляторы для труб; 13—предохранительные клапаны; 14—масляная ванна для изоляции электрофильтра; 15—защита; 16—звонки для подогрева смолы; 17—трубы для спуска смолы; 18—широковра.

ли и пробоя. Газ отводится из аппарата газопроводом 3, расположенным в верхней части. Клапаны 14—предохранительные. Электрофильтры работают очень хорошо, степень очистки в них бывает даже выше, чем в десинтеграторах; они расходуют значительно меньше энергии — примерно 0,4 ÷ 0,6 кВт на 1000 м³ газа. Расход энергии на привод вентилятора составляет 2—2,5 кВт на 1000 м³ газа.

Недостатками электрофильтров являются взрывоопасность, значительная потребная площадь и высокая начальная стоимость.

Смола, выделявшаяся в смолоотделительных приспособлениях, обычно отводится через смоляные затворы в специальные ямы. Чтобы смола не застывала, лотки и ямы снабжают паровыми подогревателями в виде труб или змеевиков.

При очистке газа, содержащего уксусную кислоту (газ из древесины и торфа), вращающиеся части и неподвижные лопатки десинтеграторов во избежание быстрого разедания делают из специальных сортов стали. Для этой же цели применяют цементируемые (с толщиной стен приблизительно 8 мм) осадительные трубы электрофильтров, стальные коронирующие проволоки заменяют никромовыми, а металлический кожух футеруют изнутри просмоленным войлоком и обшивают деревянными досками.

Сопротивление скрубберов с насадкой составляет 10—20 мм вод. ст. По мере засорения насадки сопротивление ее растет, что приводит к необходимости смены или чистки насадки. Сопротивление безнасадочных скрубберов составляет 2—5 мм вод. ст.

Широко распространены трехступенчатые скрубберы (рис. 35). Нижняя ступень—воздушная—используется для увлажнения воздуха, подаваемого в газогенераторы, путем орошения его охлаждающей водой из средней газовой ступени. Увлажнение воздуха в скруббере позволяет уменьшить расход пара на дутье и сброс фенольных промывных вод на сторону. Кроме того, достигается стабильное насыщение воздуха паром.

Скрубберы изготавливают из 6—10-мм листовой стали. Насадку выкладывают в несколько ярусов из деревянных хорд или керамических колец. Для доступа внутрь скрубберов предусматривают люки. Иногда (в каскадных скрубберах) применяют взамен насадки конические направляющие вставки, расположенные по оси и у кожуха.

В скрубберах без заполнения с помощью pulverизаторов форсунок мелко распыливают воду, подаваемую под давлением 3—5 ат. Расход охлаждающей воды в скруббере $G_{ox,в}$ без учета потерь тепла в окружающую среду определяется приблизительно по формуле:

$$G_{ox,в} = \frac{Q_1 - Q_2}{t_2 - t_1} \text{ кг/час}, \quad (12)$$

где: Q_1 и Q_2 — соответственное теплоота нагрева входящего и выходящего газа, с учетом теплоты конденсации влаги, в кал/час;

t_1 и t_2 — температуры входящей и выходящей воды в град.

Процесс охлаждения газа в скрубберах можно представить себе проходящим в две фазы. Газ, насыщенный водяным паром, входит в нижнюю часть скруббера и навстречу ему движется нагретая вода. При этом вода испаряется и газ охлаждается до тех пор, пока не истощится такое количество воды, что газ, охладившись, станет насыщенным. С момента насыщения начинается процесс конденсации водяного пара из газа. При этом происходит диффузия водяного пара из газа к воде через пленку газа и охлаждение газа.

Пользуясь формулами теплопередачи и диффузии и зная практические коэффициенты теплопередачи и диффузии, можно определить требуемую поверхность охлаждения (насадки или капель воды) для каждой из указанных фаз.

Объем скруббера, необходимый для охлаждения и очистки бессмольного газа, принимается равным примерно 0,7—1% часового объема газа при нормальных условиях, что соответствует 25—35 сек. времени пребывания газа в скруббере, считая на полный объем скруббера и нормальный объем газа. Если скруббер предназначается для охлаждения и очистки смолистого газа без предварительного смолоулавливания или газа, содержащего мелкую пыль, время пребывания газа в нем доводится до 40—50 сек. Если скруббер предназначается лишь для частичного охлаждения газа, как, например, в случае предварительного охлаждения его перед смолоулавливающими аппаратами, время пребывания газа в скруббере можно принимать равным 2—5 сек.

Скорость газов в скруббере составляет примерно 0,5—0,75 м/сек., считая на полное сечение.

Расход воды на охлаждение газа определяют из теплового баланса охлаждающего устройства.

Расход воды на охлаждение и очистку газа составляет для летних условий примерно следующие величины:

- 1) для газа из кокса и антрацита 4—5 л/м³ газа, что соответствует 16—25 л/кг топлива;
- 2) для газа из каменного угля 8—10 л/м³ газа или 25—30 л/кг топлива;
- 3) для газа из древесины, торфа и бурого угля 8—10 л/м³ газа или 15—25 л/кг топлива.

В установках с мокрой очисткой бессмольного газа в воде циркуляционных систем накапливается пыль, которая может отстояться в ямах, где она медленно движется, вследствие чего из нее выделяются более крупные взвешенные частицы. Кроме того, воду пропускают через фильтры (обычно коксовые), в кото-

рых задерживается мелкая пыль, вымытая из газа. В дальнейшем вода поступает на охлаждение. Пыль из пылеотстойных ям откачивается шламовыми насосами на площадки, подсушивается и может быть использована для сжигания в пылеугольных топках.

В установках для получения смолистого газа охлаждающую воду из скрубберов отводят в смолоотстойные ямы. Более тяжелые смолы оседают на дно, а легкие смолы всплывают. Тяжелые смолы могут быть отведены в смоляные ямы снизу, а легкие смолы — сверху. Вода, освобожденная от части взвешенных смол, поступает в яму горячей воды, где установлены ловушки для отделения легких смол, затем подается на градирню для охлаждения и из ямы холодной воды вновь поступает в скруббер. Ямы для смол снабжают подогревателями. Подогрев смолы способствует отделению от нее воды.

Характеристика смолы в отношении отделяемости от воды в значительной мере зависит от ее свойств и чистоты. Некоторые смолы образуют с водой трудно разделяемые эмульсии, которые могут содержать до 40—50% влаги, удерживаемой при отсутствии подогрева. Образованию смоловодяных эмульсий весьма способствует засоренность смолы пылью. Чем чище смола, тем легче ее отделить от воды.

Обычно на газогенераторных станциях, помимо смоляных ям емкостью, соответствующей производительности за несколько суток, предусматривают аварийные смоляные ямы большой емкости (на 1—2 месячную производительность), расположенные в значительном отдалении от станции. Практика работы газогенераторных станций подтвердила необходимость этого мероприятия, так как возможны затруднения с вывозом смол.

Сточные воды газостанций с мокрой очисткой смолистого газа ядовиты. Они содержат фенолы и их гомологи, цианистые и роданистые соединения. Сброс этих вод в реки, озера и другие водоемы обычно не разрешается. Необходимо спускать их в специальные резервуары, болота, подземные выработки или же очищать.

При газификации древесины и торфа помимо смолы улавливают также уксусную кислоту.

Для этого газ обрабатывают известковым молоком или растворами известковых солей, поглощающими уксусную кислоту. Одновременно эти растворы действуют на фенолы и образуют феноляты, которые при соответствующей щелочности среды могут выделяться в виде мылообразных веществ, засоряющих трубопроводы. Поэтому при обработке вод раствором кальциевых солей охлаждающую воду пропускают через фильтр для отделения охлаждающих фенолятов. При достаточно высокой концентрации уксуснокислого кальция раствор уваривают и получают денный уксуснокислый кальций. Этот способ требует обязательного предварительного улавливания смол из газа во избежание загрязнения получающегося продукта.

4. ПОДАЧА ТОПЛИВА

Топливо подают к транспортерам, обслуживающим газогенераторы, тем же транспортным устройством, с помощью которого топливо подается на склад, или же специальными. В первом случае топливо можно подавать в газогенераторы, минуя склад.

Для подъема топлива на уровень газогенераторов или их бункеров применяют ленточные транспортеры, шахтные подъемники, элеваторы и наклонные бремсберги. Элеваторы применяют для достаточно прочных топлив. В надбункерном помещении газогенераторов топливо транспортируют вагонетками или ленточными и скребковыми транспортерами. Применение фуникулеров и подъем вагонеток по эстакаде позволяет использовать для подачи топлива в бункеры газогенераторов тот же транспорт, что и для подачи на склад. При этом можно избежать перевалки топлива и дробления его. Фуникулеры применяют при большом грузообороте и непрочном топливе.

Подача топлива со склада в кубельях тельфером позволяет избежать сооружения других транспортных устройств.

Грохочение и измельчение топлива производится на пути подачи его к газогенераторам. Сортировочные устройства (грохоты) обычно располагают между транспортерами, поднимающими топливо, и передающими его в надбункерную галлерею, и иногда перед поднимающими транспортерами. Там же располагают дробилки (для угля). Предусматривается отвод мелочи.

Приспособления для загрузки топлива в газогенераторы описаны выше.

5. ПОДАЧА ВОЗДУХА, ГАЗА И ПАРА

Газогенераторы с естественной тягой вытеснены газогенераторами с искусственной подачей дутья. Дутье подводят в газогенераторы за счет нагнетания или всасывания. Обычно применяется первый способ. Недостатком нагнетания является выделение газа через неплотности. Работа с искусственной тягой более гигиенична, но при неплотности в газопровод засасывается или компрессорами.

Для подачи воздуха в газогенератор применяют центробежные вентиляторы. Если необходимо давление выше 1000 мм вод. ст., применяют ротационные (поршневые) вентиляторы.

В ротационных вентиляторах (при вращении лопастей, расчески) образуется замкнутое пространство, в котором лопасти трут воздух или газ и выталкивают его в нагнетательный трубопровод. Ввиду наличия неплотностей между лопастями и кожухом подаваемый объем несколько меньше теоретического.

При увеличении сопротивления центробежные вентиляторы подают меньше воздуха, тогда как количество воздуха, подаваемого ротационным вентилятором, неизменно. Поэтому последний приходится снабжать клапанами для возврата воздуха (или газа) из нагнетательной трубы в отсасывающую или же для выпуска воздуха в атмосферу в случае повышения давления.

Давление дутья под колосниковой решеткой при получении паровоздушного газа в газогенераторе без швелляхты составляет 100—300 мм и в газогенераторе со швелляхтой 100—450 мм вод. ст. При получении водяного газа давление воздуха под решеткой доходит до 1000 мм вод. ст.

В зависимости от требуемого давления для подачи газа применяют центробежные и ротационные газодувки с уплотняющими устройствами.

В установках с сухой очисткой газа в качестве резервных аппаратов дополнительно к воздушным вентиляторам устанавливают паровые инжекторы. Они не требуют электроэнергии, просты и дешевы, но вводят в газогенератор слишком много пара и создают очень сильный шум.

В газогенераторных установках пар применяют для добавки к дутью, создания завес в затворах, прогресса смоляных ям и лотков, продувки газопроводов, привода насосов и для отопления. Пар, предназначенный для дутья, обычно вводят в воздухопровод у газогенераторов, где он смешивается с воздухом.

Помимо пара из котельной на газостанциях используют пар, получаемый в охлаждающих рубашках газогенераторов. Последние соединены с паросборником и дают пар с давлением ~ 0,5 атм.

Обычно пар из паросборников направляется в магистрали низкого давления, куда подводят пар и от паровой магистрали высокого давления, соединенной с заводской котельной или с котлами-утилизаторами.

При бесшумном топливе пар можно также получать в котлах-утилизаторах и крышках-испарителях. Котлы-утилизаторы особенно распространены в установках шуровочных и загрузочных отверстий зависит от степени спекания и шлакования топлива.

Расход пара на паровые завесы шуровочных и загрузочных отверстий зависит от степени спекания и шлакования топлива. Ориентировочно можно его принять равным 10—15% веса топлива, пересчитанного на условное. Расход пара на прогресс смолы, пропарку газопровода, отопление и т. п. ориентировочно может быть принят составляющим 5—7% веса топлива, пересчитанного на условное.

Расход пара на дутье в установках водяного газа составляет примерно 1—1,5 кг/кг углерода в топливе или 0,5—0,8 кг/м³ газа.

Съем пара в рубашках при газификации древесины, торфа и влажного бурого угля составляет на 1 м² поверхности рубашки 10—20 кг/час и при газификации угля, антрацита и кокса—20—30 кг/час.

Интенсивность газификации различных топлив и газогенераторов¹

Тип газогенератора	Дрова	Щепы	Торф	Бурый уголь	Брикетты бурого угля	Каменный уголь	Антрацит	Кокс
С естественной тягой, неподвижной решеткой и ручной шуровкой	100—200	—	50—75	50—100	50—90	35—70	—	—
С дутьем и неподвижной решеткой	150—300	300—500	100—300	75—250	80—200	60—150	60—120	60—120
С вращающейся решеткой	—	400—700	300—600	250—500	150—250	120—250	120—220 300—400 ²	120—200 600—800 ²
С автоматическим шуровочным приспособлением	—	—	—	—	—	200—350	—	—

¹ Для паровоздушного газа в $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \cdot \text{час}}$. Для водного газа в $\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3 \cdot \text{час}}$.

² В $\text{м}^3/\text{м}^3 \cdot \text{час}$.

Обычно для шуровочных и загрузочных затворов используют пар с давлением больше 2 ати. Для остальных потребителей может быть использован пар с давлением до 0,5 ати.

6. РАСЧЕТ ЧИСЛА И РАЗМЕРОВ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ И СОСТАВА ГАЗА.

Определение числа газогенераторов

Для того, чтобы рассчитать число необходимых газогенераторов, надо знать расход топлива в единицу времени. Расход топлива определяется по формуле:

$$B = \frac{Q \cdot 100}{\eta Q_m} \quad (13)$$

где: B — расход топлива в $\text{кг}/\text{час}$;

Q — расход тепла потребителем в $\text{кал}/\text{час}$;

η — коэффициент использования потребителем тепла, вносимого топливом в газогенератор;

Q_m — теплотворная способность топлива в $\text{кал}/\text{кг}$.

Число газогенераторов определяется по формуле:

$$z = \frac{B}{kF} + n, \quad (14)$$

где: z — число газогенераторов;

k — интенсивность газификации в $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{час}$;

F — площадь сечения газогенератора в м^2 ;

n — число резервных газогенераторов (при общем количестве газогенераторов до 7 примерно 1, до 15—2 и до 25—3).

Данные об интенсивности газификации топлив в газогенераторах различных систем приведены в табл. 8, а данные о высоте слоя топлива — в табл. 9.

Таблица 9

Высота слоя топлива и отдельных зон для различных топлив

Топливо	Высота слоя над решеткой в мм			
	всего слоя	слоя золы	раскаленного слоя	темного слоя топлива ²
Древесина	2000—7000 ¹	—	—	—
Торф	3000—7000	—	300—2500	—
Бурый уголь	1000—2000	от 100 до 300	300—1000	200—300
Каменный уголь	600—1600	—	300—1000	300—500
Антрацит	600—1600	—	100—700	700—1200
Кокс	1000—2000	—	—	—

¹ Зависит от размера и влажности, при щепе может быть и меньше от 1000 мм.

² После засыпки.

Наиболее распространены следующие размеры площадей сечений прямоугольных газогенераторов: для дров в виде колесных длиной в 0,7÷1 м сечение шахты $1,6 \times 1,8 \times 2,5 \div 3$ м (одна загрузочная коробка) или $2 \times 4,5$ м (две загрузочные коробки); для бурого и каменного угля и антрацита в случае газогенераторов с крышеобразной решеткой — $1,5 \div 2 \times 2$ м и более и для торфа при этих же газогенераторах — $2,2 \times 2,5$ м; для каменного угля при прямоугольных газогенераторах площадь решетки составляет $1 \div 2 \times 1,7 \div 2$ м. Круглые газогенераторы без вращающихся решеток для всех топлив обычно имеют диаметр до 2,6 м и с вращающимися решетками — до 3,6 м. Высота газогенератора берется в соответствии с высотой слоя топлива.

Расчет состава газа и размеров газогенератора

В газогенераторе различают зоны золь и шлака, газификации, сухой перегонки и подсушки. Последние две объединяют под названием «зона подготовки».

Слой золь и шлака высотой 50—200 мм предохраняет колосниковую решетку от прогара и распределяет дутье по сечению газогенератора.

В зоне газификации интенсивно протекают реакции взаимодействия углерода с кислородом и водяным паром, а также между продуктами реакций и продуктами разложения топлива. При достаточно высокой температуре слоя и равномерном обтекании кусков топлива газами производительность газогенератора не ограничивается скоростью реакций восстановления, и высота зоны газификации не превышает 400—500 мм при любой интенсивности дутья. Температурной границей зоны газификации для активных топлив (древесины, торфа, бурого угля) можно считать температуру газов 800—900° и для менее активных (каменного угля, антрацита) — 1000—1100°.

В зоне подготовки происходят подсушка, сухая перегонка и нагрев топлива. Размеры зоны подготовки зависят от влажности и величины кусков топлива. При полной подготовке топлива в зону газификации поступает кокс с температурой, близкой к температуре газа, выходящего из зоны газификации и содержащий минимальные количества *H* и *O*. При неполной подготовке газа газификации поступают элементы горючей массы и влага топлива.

Неполная подготовка наблюдается при влажных и крупнокусковых топливах (древесина, торф), а также при таком высоком содержании влаги в топливе, при котором полная подготовка обуславливает получение газа с температурой ниже 70—75°. При этом происходят конденсация смол и влаги на поверхности топлива и приглушение газогенератора. Поэтому высоту слоя газа ограничивают максимумом, определяющим получение газа с температурой не ниже 80—100°. Часть влаги топлива в подобных условиях поступает в зону газификации.

Таким образом, для учета в целом процессов, происходящих в газогенераторе, следует рассматривать процессы в зоне подготовки (подсушки и сухой перегонки) и в зоне газификации. Если показатели газификации топлива хорошо известны, состав газа принимают по практическим данным. Выход газа, расход воздуха и другие параметры определяют по формулам, приведенным в главе XVI.

Состав и количество газов, выходящих из зоны газификации. В генераторном газе содержится углекислота, окись углерода, метан, водород, азот и водяные пары. Сероводорода, этилена и аммиака обычно содержится мало.

На практике в большинстве случаев не подсчитывают равновесного состава газа, так как полное равновесие не успевает установиться ни в одной части газогенератора.

Состав и выход газа в зоне газификации можно определить по Доброхотову, исходя из уравнений материальных балансов углерода, водорода и азота и теплового баланса всего газогенератора или зоны газификации, а также приняв по опытным данным значение соотношения компонентов газовой смеси на выходе из зоны газификации:

$$\frac{CO \cdot H_2O}{CO_2 \cdot H_2} = 2. \quad (14)$$

Образованием метана в зоне газификации пренебрегают вследствие низкого содержания его в смеси газов при высоких температурах и нормальном давлении.

Полученный газ, попадая в зону с более низкой температурой, незначительно меняет свой состав вследствие того, что в области низких температур скорость реакций замедлена.

Вводим обозначения для зоны газификации:

$W_{жк}$ — количество жидкой влаги, поступающей с топливом, в мол/моль С;

H_2 — количество водорода, поступающего с топливом, в мол/моль С;

O_2 — количество кислорода, поступающего с топливом, в мол/моль С;

W_n — количество пара, вводимого с дутьем, в мол/моль С;

CO, H_2, CO_2, H_2O, N_2 — количества соответствующих газов, получаемых в зоне газификации, в мол/моль С;

b — количество тепла, теряемого в окружающую среду, в кал/моль С;

V_g — выход газов, в мол/моль С;

t_k — температура кокса, поступающего в зону газификации, в град.;

t_g — температура газа на выходе из зоны газификации в град.;

t_n — температура паровоздушного дутья в град.;

$c_k; c_{H_2}; c_{CO}; c_{CO_2};$

$c_{H_2}; c_{N_2}; c_{H_2O}$ — теплоемкость соответственно кокса (весового количества, получаемого на 1 моль С), воздуха и газов, указанных индексом, в кал/моль град.

Для определения состава газа в зоне газификации служат следующие пять уравнений:

1) баланс углерода:

$$CO_2 + CO = 1; \quad (15)$$

2) баланс водорода:

$$H_2 + H_2O = W_{\text{ис}} + W_{\text{л}} + H'_2; \quad (16)$$

3) баланс кислорода:

$$2CO_2 + CO = \frac{N_2}{1,9} + H_2 - H'_2 + 2O'_2; \quad (17)$$

$$4) \quad \frac{CO \cdot H_2O}{CO_2 \cdot H_2} = 2; \quad (18)$$

5) тепловой баланс зоны газификации:

$$27\,757(CO - H_2 + H'_2) - 30\,044(H_2 - H'_2) + 95\,407CO_2 + c_k t_k - 10\,800W_{\text{ис}} + \frac{c_k t_k N_2}{0,79} = CO \cdot c_{CO} \cdot t_c + CO_2 \cdot c_{CO_2} t_c + H_2 c_{H_2} t_c + H_2O c_{H_2O} t_c + N_2 c_{N_2} t_c + b. \quad (19)$$

Если размеры слоя топлива достаточны для полной подготовки топлива, то $H'_2=0$; $O'_2=0$ и $W_{\text{ис}}=0$. В этом случае состав газа, выходящего из зоны газификации, можно определить в соответствии с методом Н. Н. Доброхотова по уравнениям (15)–(18), а также по уравнению теплового баланса всего газогенератора, согласно которому: потенциальное тепло топлива плюс теплота нагрева топлива и паровоздушной смеси минус потенциальное тепло и теплота нагрева газов сухой перегонки, смол, уноса и провала, потеря в окружающую среду и затрата тепла в охлаждающем кожухе равняется потенциальному теплу и теплоте нагрева газов, получаемых по основному генераторному процессу.

При этом теплота нагрева газов отнесена к температуре газа при выходе из газогенератора, и температурой газа задаются, а высота слоя топлива принимается по практическим данным.

Если размеры слоя топлива недостаточны для полной подготовки или влажность топлива настолько велика, что полная в зону газификации неподготовленной части топлива. Методика такого расчета разработана Д. В. Гинзбургом.

Подготовка топлива. Под влиянием нагрева происходит сухая перегонка топлива. По данным Доброхотова, можно принять следующие выходы продуктов сухой перегонки.

1. **Водяные пары.** В продукты сухой перегонки, кроме механически и коллоидально-связанной влаги топлива, переходят также в виде водяного пара приблизительно 50% всего связанного кислорода и эквивалентное ему количество водорода топлива. При быстром ходе газогенератора во влагу переходит 40% всего связанного кислорода, при очень медленном — 60%. Некоторое количество влаги упорно удерживается топливом и выделяется в зоне газификации, даже при благоприятных условиях для подготовки топлива.

2. **Углекислый газ.** В углекислый газ переходит при сухой перегонке торфа 40%, древесины — 30%, бурого угля — 20%, каменного угля, антрацита и кокса — 10% всего кислорода.

3. **Метан.** Количество водорода, переходящего в метан, составляет для древесины и торфа 15–20%, бурого угля — 25% и каменного угля — 35% всего содержания водорода в топливе.

4. **Этилен.** В этилен переходит 5% всего водорода топлива.

5. **Смола.** Выход и состав смол принимают по справочным данным. Для газогенераторов без шведшахт и при достаточно быстром ходе газогенератора можно пользоваться мнемоническим правилом Доброхотова: «в смолу уходит по весу столько углерода, сколько находится в топливе водорода». Зная состав смолы, можно рассчитать ее выход.

6. **Пыль.** Выход пыли принимают по справочным данным.

7. **Уксусная кислота и древесный спирт** (в дальнейшем названо уксусом) переходят следующее количество элементов топлива (в % по весу):

	С	Н	О
древесина хвойной породы . . .	3,52	5,67	5,33
торф	1,76	3,67	3,78

8. **Азот.** При обычных расчетах можно пренебречь выходом аммиака и принять, что азот целиком переходит в газ в виде газообразного азота.

9. **Сера.** Приблизительно 20% серы остается в золе, остальные 80% переходят в генераторный газ в виде сероводорода.

10. **Водород.** Водород, оставшийся за вычетом перешедшего в продукты сухой перегонки, переходит в газ в виде свободного водорода.

11. **Оксид углерода.** Кислород, оставшийся за вычетом перешедшего в продукты сухой перегонки, переходит в газ в виде окиси углерода.

12. **Углерод в золе.** Содержание углерода принимают по справочным данным. Обычно содержание углерода в остатках не превышает 10–12%.

13. **Газифицируемый углерод.** Оставшийся углерод подвергается воздействию водяного пара и воздуха.

Степень подготовки топлива зависит от теплообмена в зоне подготовки, а именно:

$$Q_m(1 - f_0)BF = \alpha_r V \Delta t; \quad (20)$$

$$\alpha_r V \Delta t = \alpha_r H F \Delta t; \quad (24)$$

$$Q_m(1 - f_0)B = \alpha_r H \Delta t, \quad (22)$$

где: $B = \frac{G}{F}$ — интенсивность газификации в $\text{кг}/\text{м}^2 \text{ час}$;

G — количество газифицируемого топлива в $\text{кг}/\text{час}$;

F — площадь сечения шахты в м^2 ;

V — объем зоны подготовки в м^3 ;

Δt — средняя разность температур газов и топлива в град.;

Q_m — количество тепла, необходимое для полной подготовки топлива, в $\text{кал}/\text{кг}$;

f_0 — неполнота подготовки топлива в долях единицы;

H — высота зоны подготовки топлива в м ;

α_r — коэффициент теплоотдачи в слое в $\text{кал}/\text{м}^2 \text{ час град}$.

Требуемая высота зоны подготовки для практически возможной подготовки топлива по данным Д. Б. Гинзбурга характеризуется рис. 38—41. Для дров учтена зависимость от влажности, размера кусков и интенсивности газификации; для щепы и торфа — от влажности и интенсивности газификации и для углей, антрацита и кокса — от интенсивности газификации.

Высота топливного слоя над решеткой газогенератора складывается из высот слоя золы и шлака ($\approx 100 \text{ мм}$), зоны газификации ($\approx 500 \text{ мм}$) и зоны подготовки. Высота зоны подготовки определяется условиями теплообмена.

Интенсивность газификации дров в газогенераторах с естественной тягой принимается в пределах $100\text{--}200 \text{ кг}/\text{м}^2 \text{ час}$ и в газогенераторах с искусственным дутьем $150\text{--}300 \text{ кг}/\text{м}^2 \text{ час}$. Нижний предел относится к крупным дровам с высоким

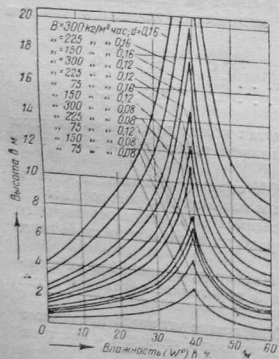


Рис. 38. Высота зоны подготовки при газификации дров.

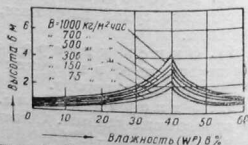


Рис. 39. Высота зоны подготовки при газификации щепы.

содержанием влаги и верхний — к мелким с малым содержанием влаги.

При выборе соотношения размеров сечения шахты и площади решетки газогенератора нужно учитывать следующее. Уклон заплечиков должен быть не меньше 50° , а отношение площадей сечений решетки и шахты должно составлять $1:2,5 \div 3,0$. Увеличение площади сечения газогенератора одновременно за счет длины и ширины сечения нежелательно, так как дрова не могут плотно заполнять газогенератор по ширине. Значительное увеличение ширины сечения необходимо компенсировать соответственным увеличением высоты газогенератора.

Дровяные газогенераторы надо увеличивать в длину. Ширина шахты не должна превышать $1600\text{--}1800 \text{ мм}$. При большой длине шахты необходимо устанавливать две загрузочные коробки.

Интенсивность газификации щепы обычно не превышает $700 \text{ кг}/\text{м}^2 \text{ час}$. При большей интенсивности наблюдается вынос кусков древесины.

Интенсивность газификации торфа в газогенераторах с ручным золоудалением и искусственным дутьем составляет $100\text{--}300 \text{ кг}/\text{м}^2 \text{ час}$. Сечение газогенераторов — круглое или прямоугольное, с соотношением длины и ширины $1,3 \div 1,0 : 1$. В газогенераторах с вращающейся решеткой интенсивность газификации составляет $300\text{--}600 \text{ кг}/\text{м}^2 \text{ час}$.

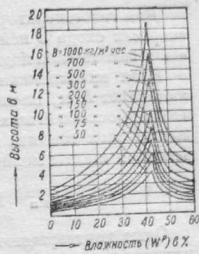


Рис. 40. Высота зоны подготовки при газификации торфа.

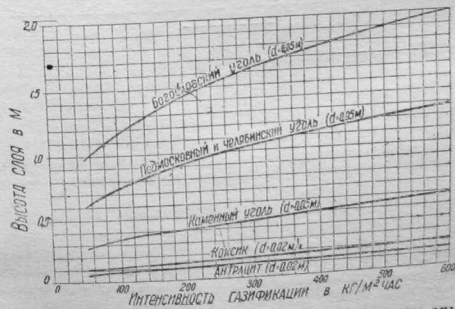


Рис. 41. Высота зоны подготовки при газификации угля, антрацита и кокса.

Для газогенераторов со швельшахтой, вследствие повышенной скорости схода в ней топлива, требуется дополнительное увеличение высоты слоя подготовки по сравнению с показанной на рис. 40.

Если вычисленная по формуле (22) высота зоны подготовки составляет H м, площадь швельшахты $F_{ш}$ м² и диаметр ее $d_{ш}$ м, площадь основной шахты $F_{осн}$ м² и диаметр ее $d_{осн}$ м, а принимаемая высота слоя топлива в швельшахте $h_{ш}$ м, то требуемую высоту основной шахты можно определить из выражения:

$$h_{осн} = H - h_{ш} \left(\frac{F_{ш}}{F_{осн}} \right)^{0,5} = H - h_{ш} \frac{d_{ш}}{d_{осн}}. \quad (23)$$

Опыт подтверждает данные теоретических расчетов, согласно которым при газификации бурого угля не требуется высокий слой топлива. Излишняя высота слоя ухудшает условия обслуживания и ход газогенератора. Интенсивность газификации в современных газогенераторах с вращающейся решеткой принимается в пределах 200—500 кг/м² час.

В соответствии с малой влажностью каменного угля, антрацита и кокса количество тепла, затрачиваемого на его нагрев, невелико. Даже при невысоком слое топлива достигается полная или почти полная его подготовка. Интенсивность газификации принимается в пределах 100—350 кг/м² час.

Во всех практических случаях газификации каменных углей, антрацита и кокса высота слоя достаточна для подготовки топлива. Ухудшение состава газа объясняется прогарами и шлакованием.

Глава седьмая

ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛА ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ

1. СПОСОБЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛА ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ

Если газы выходят из рабочей камеры печи с высокой температурой, тепло их используют для подогрева воздуха и низкокалорийного газа, поступающих в печь, а также для получения пара, подогрева воды и материалов, сушки и т. д.

Из указанных способов использования тепла отходящих газов только подогрев газа и воздуха повышает к. п. д. самой печи и уменьшает расход топлива на печь. В остальных случаях повышается к. п. д. установок в целом.

Приспособления для подогрева воздуха и газа разделяются на регенеративные и рекуперативные. Схема действия регенератора представлена на рис. 42. Газы, выходящие из печи 5, проходят регенераторы-камеры 4', 8' с насадкой, которой отдают часть своего тепла. Из регенераторов отходящие газы отводятся каналами 3', 7', 9 и 10 в дымовой боров 11 и далее в дымовую трубу. Горючий газ и воздух, поступающие в печь по каналам 1, 3 и 7, проходят регенераторы 4, 8 с разогретой насадкой и подогреваются в них. Через некоторый промежуток времени насадки 4', 8' оказываются сильно разогретыми, а насадки 4, 8 — охлажденными. Вследствие этого температура отходящих газов сильно повышается, а температура подогрева газа и воздуха значительно падает. Тогда переключают клапаны 6 и 2 и направление движения газов меняется. Газ и воздух поступают для подогрева в регенераторы 4', 8', а отходящие газы отводятся через охладившиеся регенераторы 4, 8.

Регенераторы характеризуются периодическим аккумулярованием и отдачей тепла насадкой и отсутствием одновременного соприкосновения греющих и нагреваемых газов с передающей тепло кладкой.

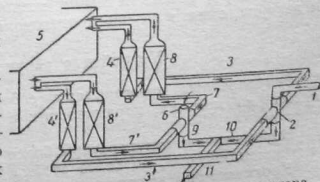


Рис. 42. Схема действия регенератора.

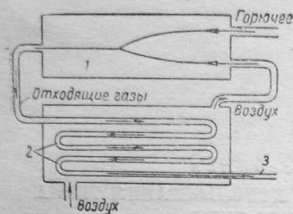


Рис. 43. Схема действия рекуператора.

Недостатки регенераторов заключаются в том, что они обуславливают неустойчивый режим печи и требуют установки и переключения клапанов. Однако регенераторы плотны, могут иметь большие размеры и выкладываются из сравнительно дешевых материалов. Регенераторы применяют для подогрева газа и воздуха.

Схема действия рекуператора представлена на рис. 43. Отходящие газы из печи 1 отводятся

до каналов 2, омываемым нагревающимся воздухом. Нагретый воздух поступает в печь или в топку для горения. Охлажденные отходящие газы отводятся дымовым боромом 3 в дымовую трубу.

Рекуператоры характеризуются непрерывной передачей тепла через стенку от греющих газов к нагреваемым. Они позволяют поддерживать постоянный режим и не требуют установки и переключения клапанов, но менее плотны, чем регенераторы. В больших керамических рекуператорах легко нарушается плотность. Рекуператоры, предназначенные для подогрева воздуха до высокой температуры, изготавливают из специальных огнеупорной керамики и металла. Рекуператоры применяют только для подогрева воздуха.

2. РЕКУПЕРАТОРЫ

Теплообмен в рекуператорах

Возможен теплообмен в прямотоке, противотоке и перекрестном токе. При прямотоке воздух не может быть нагрет выше температуры отходящих газов на выходе. При противотоке возможен более высокий подогрев воздуха. Температура стенки рекуператора, лежащая между температурами отходящих газов и воздуха, выше в случае противотока.

Устройство рекуператоров

Рекуператоры представляют собой теплообменники, выполненные из металла, керамических и других огнеупорных материалов.

Керамические рекуператоры более громоздки и менее плотны, чем металлические, но более стойки при высоких температурах.

Керамические элементы изготавливают преимущественно из шамота (допускает подогрев до 1000°) и иногда из корунда и кар-

борунда. Для подогрева воздуха до 350° применяют рекуператоры из обычных сортов стали. Чугунные рекуператоры допускают подогрев воздуха до 500°. Для подогрева воздуха до более высоких температур рекуператоры изготавливают из жаропрочных сталей, содержащих кремний, никель и алюминий. Максимально допустимые температуры стенок из различных материалов:

шамот	1400°
карборунд	1500°
чугун	600°
хромистый чугун	1100°
обыкновенная сталь	450°
жароупорная сталь	800—1000°

Керамические рекуператоры

Керамические рекуператоры выполняют из фасонных элементов, нормального кирпича, специальных плит с пазами и выступами и труб. Преимущественно распространены трубчатые рекуператоры. При нагревании элементы рекуператора расширяются и раздвигают или поднимают соседние. При охлаждении элементы сжимаются, причем поднятые опускаются в первоначальное положение, а раздвинутые остаются в том же положении, образуя открытые швы. При повторном нагревании открытые швы не закрываются, а вследствие трения кирпича о кирпич могут расширяться. Поэтому избегают вертикальных швов, в основном применяя вертикально расположенные трубы. При скоростях газов (при 0°) больше 0,75—1 м/сек. обычно требуются искусственные подвод дутья и отвод продуктов горения.

Присос воздуха к продуктам горения составляет в плотных рекуператорах 20—35% начального количества продуктов горения.

Для уплотнения стыков элементов керамических рекуператоров обычно применяют ребра и вкладыши, образующие лабиринтное уплотнение, и замазывают швы специальным раствором. Плотное примыкание рекуперативных элементов достигается шлифованием торцовых граней элементов и вкладышей после обжига.

В рекуператоре, показанном на рис. 44, трубы имеют один или два канала и располагаются вертикально. Фиксирование взаимного расположения труб и их соединение достигается с помощью фасонных плиток, снабженных отверстиями для вертикально располагаемых труб, а если требуется, то также и отверстиями для соединения между собой горизонтальных каналов.

Удельная поверхность шамотных рекуператоров составляет 6—12 м²/м³; коэффициент теплопередачи 2—5 кал/м² час. В случае подогрева воздуха выше 900° (температура дымовых газов выше

1300°) верхние ряды выкладываются из карборундовых элементов. Применение карборунда нежелательно в условиях воздействия шлаков.

Металлические рекуператоры

Стальные рекуператоры могут быть трубчатые и пластинчатые. Пластинчатые рекуператоры более компактны и имеют меньший вес. Нагревательные поверхности располагают вертикально во избежание засорения. Толщина металла составляет 2—3 мм. Воздух подается искусственно. Число поворотов каналов для уменьшения сопротивления должно быть минимальным. Для уменьшения потерь тепла рекуператоры изолируют.

В металлических рекуператорах из обыкновенной стали часто стремятся понизить температуру стенки. Это достигается увеличением теплоотдачи от стенки к воздуху, уменьшением температуры отходящих газов перед поступлением в рекуператор за счет присоса воздуха или более холодных газов, уменьшением количества газов, поступающих в рекуператор, и применением прямотока. Все эти способы, за исключением первого, уменьшают эффективность использования тепла отходящих газов.

При высоких температурах применяют рекуператоры из жароупорных сплавов. Из жароупорных сталей наибольшее применение имеют хромоникелевые аустенитовой структуры. Хром понижает способность окисляться, никель улучшает механические свойства. В СССР применяются марки ЭИЗС (Cr—16%, Ni—23%, Si—2,3%) и ЭИ2 (Cr—18%, Ni—8%). Ввиду дефицитности никеля эти стали заменяют хромистыми с содержанием Cr до 30%. Хро-

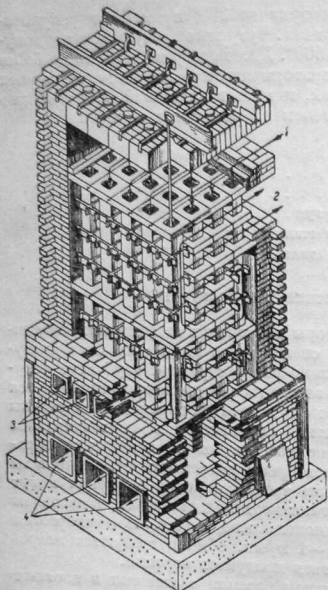


Рис. 44. Керамический рекуператор с вертикальными трубами:
1, 4—ход дымовых газов; 2, 3—ход воздуха.

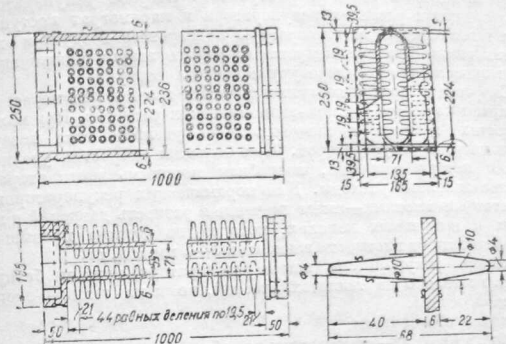


Рис. 45. Игольчатый рекуператор.

мистая сталь с 12—14% Cr выдерживает температуру до 800°, а с 18—30% Cr — до 900—1100°. Выше 700° сталь с содержанием 18—30% Cr обладает низкой механической прочностью. Сильхромовые стали содержат хром и кремний (иногда и марганец), а сильхромоалюминиевые — хром, алюминий и кремний. Если в газах присутствуют сернистые соединения, хромоникелевые стали применять нельзя.

В последнее время получают распространение чугунные игольчатые рекуператоры (рис. 45), в которых теплоотдача и поверхность нагрева увеличены (см. табл. 10) путем применения игольчатых труб.

Таблица 10

Характеристика металлических рекуператоров

Тип рекуператора	Удельная поверхность в м ² /м ³	Коэффициент теплопередачи в кал/м ² час град.
Трубчатые	12—25	10—20
Пластинчатые	40—50	10—15
Игольчатые	20—30	15—25

Иногда в рекуператорах комбинируют металлические и немаetalлические части.

Расчет рекуператора

При расчете бывают заданы температура и количества поступающих в рекуператор газов и воздуха. Определяют темпера-

туру выходящих газов и поверхность нагрева рекуператора. При заданных размерах рекуператора и параметрах поступающих газов определяют температуры подогретого воздуха и отходящих газов. При проектировании рекуператоров также выбирают экономичную температуру подогрева воздуха.

Скорости движения воздуха и дымовых газов в рекуператорах выбирают на основе технико-экономических расчетов. При малых скоростях воздуха и дымовых газов увеличивается поверхность нагрева рекуператоров. При больших скоростях увеличиваются потери давления, потребная мощность вентилятора и эксплуатационные расходы. Для керамических рекуператоров—недостаточно плотных—имеет значение и разность давлений в дымовых и воздушных каналах, которая не должна превышать в зависимости от плотности элементов 3—5 мм вод. ст.

Размеры рекуператора (как и регенератора) должны базироваться не только на теплотехнической, но и на технико-экономической основе.

Вводим обозначения:

V^a, c^a, t_1^a и V^e, c^e, t_2^e — соответственно объем, теплоемкость и температура входящего и выходящего воздуха; V^g, c^g, t_1^g и V^d, c^d, t_2^d — то же для входящих и выходящих дымовых газов;

ρ — коэффициент, учитывающий потери тепла в окружающую среду и равный 0,85—0,95.

Температура отходящих газов определяется из уравнения теплового баланса:

$$\rho (V^g c^g t_1^g - V^d c^d t_2^d) = V^a c^a t_2^a - V^e c^e t_1^e = Q. \quad (1)$$

При расчете керамических рекуператоров учитывают присос воздуха из воздушных каналов в дымовые.

Поверхность нагрева рекуператора определяется из выражения:

$$F = \frac{Q}{K \Delta t_{cp}} \text{ м}^2, \quad (2)$$

где: Q — количество тепла, передаваемого воздуху, или количество тепла, отдаваемое отходящими газами, за вычетом потерь тепла в окружающую среду, в кал/час; K — средний коэффициент теплопередачи в кал/м² час град.; Δt_{cp} — среднее значение разности температур нагреваемых и охлаждающихся газов.

Взаем составления теплового баланса можно воспользоваться приведенными ниже формулами, в которые входят водяные эквиваленты дымовых газов и воздуха.

Потери тепла в окружающую среду при пользовании этими формулами учитывают, уменьшая на 5—15% водяной эквивалент дымовых газов.

Вводим обозначения:

F — поверхность нагрева рекуператора в м²;
 $W^d = V^d c^d$ — водяной эквивалент нагревающего газа в кал/час град.;
 $W^e = V^e c^e$ — водяной эквивалент нагреваемого газа в кал/час град.;
 V^d — количество дымовых газов в м³/час;
 V^a — количество воздуха в м³/час;
 c^d — удельная теплоемкость дымовых газов в кал/м³ град.;
 c^a — удельная теплоемкость воздуха в кал/м³ град.;
 Δt_{in} — разность температур дымовых газов и воздуха в начале — в месте поступления дымовых газов, в град.;
 $\Delta t_{к}$ — разность температур дымовых газов и воздуха в конце — в месте выхода дымовых газов, в град.;
 e — основание натуральных логарифмов, равное 2,718.

При заданных поверхности нагрева, температурах поступающих дымовых газов и воздуха, водяных эквивалентах нагревающего и нагреваемого газа температура выходящих дымовых газов при прямом токе определяется из выражения:

$$t_2^d = t_1^d - \frac{W^e}{W^d + W^e} (t_1^d - t_1^e) \left[1 - e^{-\frac{KF}{W^d} \left(1 + \frac{W^d}{W^e} \right)} \right] \quad (3)$$

и температура нагретого воздуха:

$$t_2^e = t_1^e + \frac{W^d}{W^d + W^e} (t_1^d - t_1^e) \left[1 - e^{-\frac{KF}{W^d} \left(1 + \frac{W^d}{W^e} \right)} \right], \quad (4)$$

При противотоке:

$$t_2^d = t_1^d - (t_1^d - t_1^e) \frac{W^e}{W^d} \left[1 - \frac{1 - \frac{W^d}{W^e}}{1 - \frac{W^d}{W^e} e^{-\frac{KF}{W^d} \left(1 - \frac{W^d}{W^e} \right)}} \right] = t_1^d - (t_1^d - t_1^e) \frac{W^e}{W^d} (1 - f); \quad (5)$$

$$t_2^e = t_1^e - (t_1^d - t_1^e) \frac{1 - \frac{W^d}{W^e}}{1 - \frac{W^d}{W^e} e^{-\frac{KF}{W^d} \left(1 - \frac{W^d}{W^e} \right)}} = t_1^e - (t_1^d - t_1^e) f, \quad (6)$$

где

$$f = \frac{t_1^d - t_2^e}{t_1^d - t_1^e} = \frac{1 - \frac{W^d}{W^e}}{1 - \frac{W^d}{W^e} e^{-\frac{KF}{W^d} \left(1 - \frac{W^d}{W^e} \right)}}. \quad (7)$$

Значение f характеризует неполноту подготовки (отношение незавершенной разности температур к максимальной).

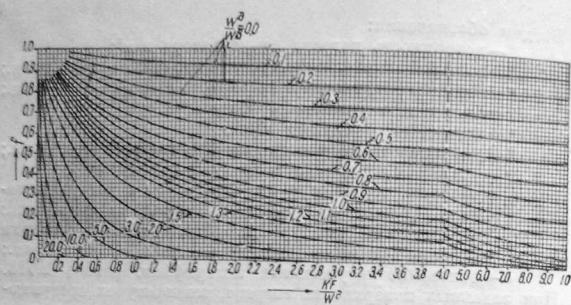


Рис. 46. Значение $f = \frac{1 - \frac{W^0}{W^0}}{1 - \frac{W^0}{W^0} e^{-\frac{KF}{W^0}} \left(1 - \frac{W^0}{W^0}\right)}$

Значение f дано на рис. 46 в зависимости от $\frac{W^0}{W^0}$ и $\frac{KF}{W^0}$.

При заданной температуре подогрета воздуха или газа из уравнения (6) может быть определено значение f и по рис. 46 значение $\frac{KF}{W^0}$, а отсюда и площадь рекуператора F . Последнюю можно определить также из выражения (2). В этом случае нужно определить Δt_{cp} .

При протокотке:

$$\Delta t_{cp} = \frac{(t_1^0 - t_1^e) - (t_2^0 - t_2^e)}{2,303 \lg \frac{t_1^0 - t_1^e}{t_2^0 - t_2^e}} = \frac{\Delta t_H - \Delta t_K}{2,303 \lg \frac{\Delta t_H}{\Delta t_K}} \quad (8)$$

и при противотоке:

$$\Delta t_{cp} = \frac{(t_1^0 - t_2^e) - (t_2^0 - t_1^e)}{2,303 \lg \frac{t_1^0 - t_2^e}{t_2^0 - t_1^e}} = \frac{\Delta t_H - \Delta t_K}{2,303 \lg \frac{\Delta t_H}{\Delta t_K}} \quad (9)$$

При перекрестном токе Δt_{cp} принимается равной среднему арифметическому из разности температур при входе и выходе дымовых газов. При зигзагообразном направлении одного из газов расчет ведется по формулам противотока.

Величина K определяется из выражения:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha^*} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha^0}} \text{ кал/м}^2 \text{ час град.}, \quad (10)$$

где: α^0 — коэффициент теплоотдачи от дымовых газов к стенке в кал/м² час град.;

α^* — коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху в кал/м² час град.;

δ — толщина стенки в м;

λ — коэффициент теплопроводности материала стенки в кал/м час град.

Величина α^0 зависит от скорости воздуха w_0 м/сек. (приведенной к 0°) и диаметра канала d м. Если сечение канала не круглое, то d — гидравлический диаметр:

$$d = \frac{4F}{S} \text{ м}, \quad (11)$$

где: F — живое сечение канала в м²;

S — часть периметра, по которой происходит теплоотдача в м.

Обычно скорость воздуха и продуктов горения (при 0°) в керамических рекуператорах составляет примерно 0,5 м/сек. и не превышает 2 м/сек.; в металлических — воздуха 5—15 м/сек. и дымовых газов 1—5 м/сек. В холодном конце рекуператора можно принимать большие скорости, чем в горячем.

На рис. 47 показана зависимость α_k^0 от w_0 .

Горизонтальные участки дают величины α_k^0 , не зависящие от скорости (ламинарное движение).

Ввиду ничтожного содержания в воздухе водяных паров и углекислоты:

$$\alpha^e = \alpha_k^e. \quad (12)$$

Для дымовых газов

$$\alpha^0 = \alpha_k^0 + \alpha_r^0, \quad (13)$$

где: α_k^0 — коэффициент теплоотдачи конвекцией от дымовых газов к стенке в кал/м² час град.;

α_r^0 — коэффициент теплоотдачи излучением от дымовых газов к стенке, в кал/м² час град.;

α_k^0 — определяется по рис. 47.

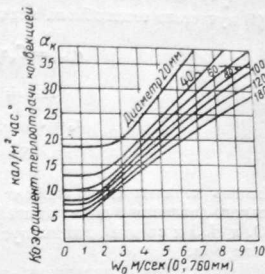


Рис. 47. Коэффициент теплоотдачи конвекцией для труб и каналов.

α_3^0 определяется в соответствии с расчетными формулами (1)–(4) лучистого теплообмена главы III:

$$q_{в,к,л} = C_{\epsilon} \epsilon_{\epsilon} \left(\frac{T_{\epsilon}}{100} \right)^4 A_{см}; \quad (14)$$

$$A_{см} = 1 - \left(\frac{T_{к}}{T_{\epsilon}} \right)^{3,6}; \quad (15)$$

$$\epsilon_{\epsilon} = \epsilon_{CO_2} + \beta \epsilon_{H_2O} - \Delta \epsilon_{\epsilon}; \quad (16)$$

$$S = m \frac{v}{F}. \quad (17)$$

Степень черноты газов зависит от величины pS , т. е. от парциального давления в долях атмосферы p ата, содержащихся в газах CO_2 и H_2O и средней длины пути лучей до ограждающей поверхности S м.

На рис. 11–14 приведены значения ϵ_{CO_2} , ϵ_{H_2O} и поправочных коэффициентов β и $\Delta \epsilon_{\epsilon}$. Зная их, можно подсчитать количество тепла $q_{в,к,л}$, передаваемого в результате теплообмена излучением и отсюда:

$$\alpha_3^0 = \frac{q_{в,к,л}}{t_1 - t_{см}}, \quad (18)$$

где t_1 и $t_{см}$ — температуры соответственно газового слоя и поверхности в град.

Расчет общего коэффициента теплопередачи производится для средних условий в рекуператоре или, что точнее, для горячего и холодного конца, с последующим подсчетом среднего значения. Приблизительно величина K составляет для керамических рекуператоров 2–5 и для металлических — 10–25 кал/м² час град. (см. выше).

Температуру стенки определяют особенно часто в металлических рекуператорах ввиду опасности перегрева стенки. В рекуператоре с противоточным движением газов наиболее вероятен перегрев стенки у места поступления отходящих газов. При проточке проверяется температура стенки у мест входа и выхода отходящих газов.

Температура поверхности плоских стенок определяется из выражений:

и со стороны воздуха:

$$t_{см}^* = t^0 - \frac{K}{\alpha^0} (t^0 - t^{\epsilon})^{\circ} \quad (19)$$

$$t_{см}^* = t^{\epsilon} + \frac{K}{\alpha^{\epsilon}} (t^{\epsilon} - t^0)^{\circ}, \quad (20)$$

где температуры и коэффициенты теплопередачи и теплоотдачи отнесены к проверяемой точке.

В металлических рекуператорах:

$$t_{см}^0 \approx t_{см}^{\epsilon}.$$

Разность температур в стенках элементов вызывает термические напряжения, могущие обусловить появление трещин.

Термическую прочность шамотных элементов проверяют по формуле:

$$K (t_x^0 - t_x^{\epsilon}) \delta < 8200, \quad (21)$$

где: K — общий коэффициент теплопередачи для проверяемой точки в кал/м² час град;

t_x^0 и t_x^{ϵ} — температуры отходящих газов и воздуха в проверяемой точке в град;

δ — толщина стенки в см.

Численное выражение правой части неравенства дано для шамота. Увеличение толщины стенок, устройство ребер, приливов и т. п. уменьшает термическую прочность. Проверку прочности делают обычно для участков у входа и выхода газов.

3. РЕГЕНЕРАТОРЫ

Теплообмен в рекуператорах

В рекуператоре ни на одно мгновение не наступает установившееся тепловое состояние. Непосредственно за переводом клапана в нагретую насадку поступает воздух. Насадка постепенно охлаждается, вначале быстрее, потом медленнее, и нагрет воздуха охлаждается. После вторичного перевода клапана отходящие газы подогревают насадку вначале быстро, потом медленнее и отводятся все с более и более повышающейся температурой. На рис. 48 показано изменение во времени температуры в различных частях насадочного кирпича толщиной 63 мм после начала подачи воз-

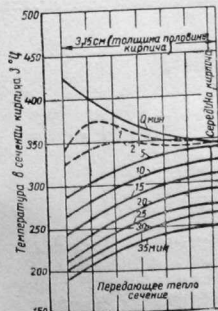


Рис. 48. Изменение во времени температуры по толщине насадочного кирпича.



Рис. 49. Изменение температуры поверхности кирпича (в одной точке) за цикл.

духа. К началу периода подачи воздуха температура поверхности кирпича выше, чем в середине. Проходящий воздух быстро снижает температуру поверхностных слоев кирпича. Вскоре температура на некоторой глубине оказывается более высокой, чем в середине и с поверхности кирпича, т. е. отдача тепла идет в двух направлениях. Через короткое время температура в середине кирпича становится наиболее высокой и теплоотдача происходит от середины кирпича наружу.

Однако это имеет место при достаточно тонком кирпиче. В толстом кирпиче середина плохо используется.

Таким образом, в регенераторе происходит два процесса обмена тепла: между стенкой и газом и в стенке.

Изменение температур газа и поверхности кирпича насадки в течение периодов нагрева и охлаждения представлено на рис. 49.

За единицу времени для регенераторов принимают суммарную продолжительность периодов нагрева или охлаждения.

Устройство регенераторов

В зависимости от направления газов различают вертикальные и горизонтальные регенераторы.

На рис. 50 представлен вертикальный регенератор. Под ним находится поднасадочный канал, распределяющий газы по насадке. Канал перекрыт сводами-хомутиами, между которыми имеются промежутки для прохода газов.

В вертикальных регенераторах отходящие газы подводятся вверх и отводятся снизу, а воздух — наоборот. При работе с естественной тягой, т. е. при малом сопротивлении, движение газов в регенераторах является самоуравновешивающимся (см. главу II).

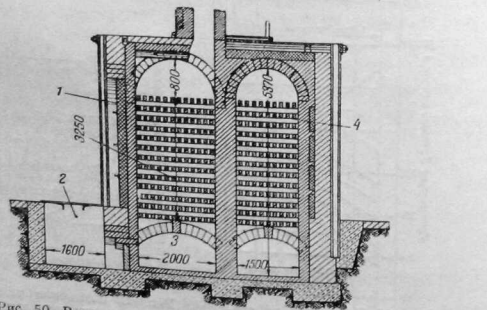


Рис. 50. Вертикальный регенератор — поперечный разрез:
1 — своды; 2 — приямок; 3 — поднасадочный канал; 4 — насадка

К материалу насадки регенераторов предъявляются следующие требования:

- 1) максимальная строительная, химическая и термическая прочность;
- 2) высокая теплоемкость (с целью уменьшения веса кирпича);
- 3) высокая теплопроводность для возможности увеличения толщины кирпича и уменьшения объема регенератора.

Обычно материалом для насадки регенераторов служит шамот, стойкий в условиях высоких температур и воздействия печных газов. В отдельных случаях применяют магнезит и диопсид.

Насадку регенераторов в большинстве случаев выкладывают из прямоугольного кирпича. Иногда насадочному материалу придают более сложную форму с целью улучшения теплоотдачи, увеличения активной поверхности или уменьшения засорения. Толщину кирпича выбирают с таким расчетом, чтобы он был прочен под нагрузкой и в то же время в достаточной мере принимал участие в теплообмене. При слишком малой толщине кирпича увеличиваются колебания температуры греющих и нагреваемых газов и уменьшается коэффициент теплопередачи. С уменьшением толщины кирпича растет поверхность нагрева и уменьшается продолжительность периода. При большой толщине кирпича его сердцевина не принимает участия в теплообмене, что бесполезно увеличивает объем насадки.

Продолжительность периода подачи воздуха или газа и периода отходящих газов обычно составляет суммарно 20—40 мин. Для этих условий достаточно толщина кирпича в 25—40 мм. Большая толщина (65—160 мм) берется из условий прочности.

Обычно насадку регенераторов выкладывают из кирпича, уложенного на ребро. Можно расплгать насадку сплошными рядами а в вертикальных регенераторах также чередующимися рядами а с перебивкой каналов — смещенная в шахматном порядке и несмещенная насадки (рис. 51б, в).

В насадке с чередующимися рядами газы, пройдя один ряд кирпича, меняют скорость и направление, которые в насадке со сплошными каналами остаются неизменными.

Удельная поверхность насадки со сплошными каналами, несколько меньше, чем насадки с чередующимися рядами, ввиду наличия в последней открытых горизонтальных поверхностей. Разрывы каналов способствуют турбулизации потока газов.

Насадка со сплошными каналами прочна и мало засоряется. Однако в случае засорения части такого канала, выключается весь канал, что не имеет места в насадке с перебивкой каналов. Чистка насадки со сплошными каналами находит затруднение. Насадку со сплошными каналами можно чистить на ходу путем промывки водой и обдувания сжатым воздухом или паром.

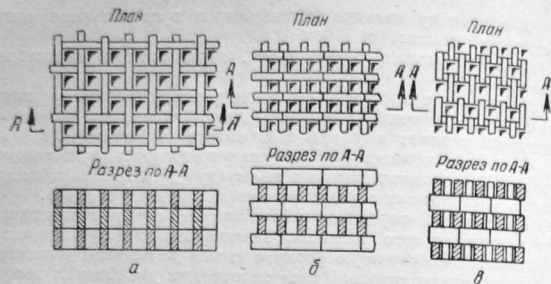


Рис. 51. Типы регенеративных насадок.

Расстояние между кирпичами в насадке вертикальных регенераторов равняется 60—100 мм и в горизонтальных—100—200 мм. Занятая насадкой часть сечения—заполнение насадки—составляет 30—50% и в среднем 40—45%.

Уменьшение ширины промежутков увеличивает опасность засорения, улучшает теплоотдачу конвекцией и уменьшает теплоотдачу излучением.

В последнее время получила распространение насадка, являющаяся разновидностью насадки с чередующимися рядами. В этой насадке (рис. 51-в) кирпичи в каждом продольном ряду расположены в шахматном порядке. Поэтому торцовые поверхности кирпича открыты и поверхность нагрева насадки возрастает за счет вертикальной поверхности, менее подверженной засорению, и улучшается устойчивость кладки.

Расчет регенераторов

Расчет регенераторов состоит в установлении распределения продуктов горения в регенераторах, определении коэффициента теплообмена насадки, поверхности нагрева, изменения температуры нагреваемого воздуха и охлаждающихся дымовых газов в течение периода и сопротивлений на пути газов.

Кроме того, можно определять оптимальные размеры каналов (или скорость) в насадке и толщину кирпича, обеспечивающие хороший теплообмен, не слишком большую затрату напора и малую стоимость.

При данных размерах регенератора определяют температуры подогрева газа и воздуха и температуру выходящих из регенератора отходящих газов.

Желателен возможно более высокий подогрев воздуха и газа. Предель степени подогрева определяется уменьшением разности

температур воздуха или газа и отходящих газов и соответственным увеличением размеров регенераторов, обуславливающим увеличение потерь в окружающую среду и присоса воздуха.

Можно принять, что максимальная температура подогрева газа и воздуха на 250—300° ниже температуры поступающих отходящих газов. Температура отходящих газов на выходе из регенераторов зависит от их распределения по регенераторам и использования в каждом регенераторе. Обычно она на 200—400° превышает температуру поступающих газов.

Эти соображения позволяют предварительно задать распределением температур в регенераторах. Возможность такого распределения проверяется по тепловому балансу регенераторов. Приходной частью этого баланса является количество тепла, вносимого отходящими газами¹, а расходными—количество тепла, затрачиваемое на нагрев воздуха и газа, и количество тепла, уносимого из регенераторов отходящими газами (с учетом присоса воздуха в регенераторы). При правильном принятии распределения температур потери тепла в окружающую среду соответствуют нормальной—5—10%. Если распределение температур в воздушных и газовых регенераторах одинаковое или имеются только воздушные регенераторы, то, задавшись температурой подогрева воздуха и газа и величиной потери тепла регенераторами в окружающую среду, по разности теплового баланса можно определить величину теплоты нагрева выходящих из регенераторов газов, а отсюда и их температуру. Если распределение температур в газовых и воздушных регенераторах неодинаковое, то величину теплоты нагрева отходящих газов на выходе уточняют по их распределению в регенераторах (см. ниже).

Для определения поверхности нагрева 1 м³ насадки (удельной поверхности) требуется разделить ее общую поверхность на полезный занимаемый объем. Для насадки с чередующимися рядами удельная поверхность нагрева при сплошной кладке продольных рядов (учтено 75% горизонтальной поверхности, как быстро засоряющейся)—по рис. 51б.

$$f = \frac{2}{a + \delta} + \frac{1.5a\delta}{(a + \delta)^2} \text{ м}^2/\text{м}^3 \quad (22)$$

и при шахматном расположении кирпичей по рис. 51в.

$$f = \frac{2(a + 2\delta)}{(a + \delta)^2} + \frac{0.75\delta(2a - \delta)}{h(a + \delta)^2} \text{ м}^2/\text{м}^3, \quad (23)$$

где: a —расстояние между кирпичами в м;

δ —толщина кирпича в м;

h —высота кирпича в м.

Поверхность растет с уменьшением величины промежутков и толщины кирпича.

¹ Можно учитывать догорание в регенераторах продуктов горения и сгорание в них некоторого количества горючих газов.

При расчете регенераторов следует принимать не действительную, а эквивалентную толщину кирпича.

Для насадок с чередующимися рядами, разделив объем, занимаемый насадочным кирпичом, на поверхность нагрева, получаем для сплошной кладки продольных рядов:

$$\delta' = \delta \frac{1}{1 + \frac{0,75a\delta}{(a+\delta)h}} \text{ М} \quad (24)$$

и при шахматном расположении кирпичей в продольных рядах:

$$\delta = \frac{\delta(2a+3\delta)}{2h(a+2\delta) + 0,75\delta(2a-\delta)} \text{ М.} \quad (25)$$

В противоположность насадке со сплошными каналами в насадках с чередующимися рядами эквивалентная толщина меньше действительной за счет открытых горизонтальных поверхностей кирпичей насадки.

Распределение отходящих газов

Количество тепла, оставляемое газам в регенераторе, с достаточной точностью может быть принято пропорциональным количеству тепла, воспринимаемому нагреваемой средой.

Введем обозначения: суммарный объем отходящих газов — $V \text{ м}^3/\text{сек.}$; объем отходящих газов, поступающих в газовый регенератор — A_1^0 и в воздушный — $B_0^0 \text{ м}^3/\text{сек.}$; объем воздуха — $V_a \text{ м}^3/\text{сек.}$ и газа — $V_g \text{ м}^3/\text{сек.}$; температура отходящих газов, поступающих в оба регенератора θ_1^0 , выходящих из газового регенератора θ_2^0 и из воздушного — θ_3^0 ; температура горячего газа, поступающего в регенератор — θ_1^0 , и выходящего — θ_2^0 и соответственно входящих в регенераторы — c_0^0 и выходящих из воздушного регенератора — c_1^0 и из газового — $c_2^0 \text{ кал/м}^3 \text{ град.}$ удельная теплоемкость поступающего в регенератор воздуха — c_a^0 и выходящего — c_g^0 и соответственно газа — c_1^0 и $c_2^0 \text{ кал/м}^3 \text{ град.}$

Тогда количество тепла, оставляемое отходящими газам в воздушном регенераторе:

$$Q_0^0 = B_0^0 c_0^0 \theta_1^0 - B_0^0 c_1^0 \theta_2^0 = B_0^0 (c_0^0 \theta_1^0 - c_1^0 \theta_2^0) \text{ кал/сек.} \quad (26)$$

Количество тепла, оставляемое отходящими газам в газовом регенераторе:

$$Q_1^0 = A_1^0 c_1^0 \theta_1^0 - A_1^0 c_2^0 \theta_2^0 = A_1^0 (c_1^0 \theta_1^0 - c_2^0 \theta_2^0) \text{ кал/сек.} \quad (27)$$

Количество тепла, воспринимаемое воздухом:

$$Q_a^0 = V_a c_a^0 \theta_3^0 - V_a c_a^0 \theta_1^0 = V_a (c_a^0 \theta_3^0 - c_a^0 \theta_1^0) \text{ кал/сек.} \quad (28)$$

Количество тепла, воспринимаемое газом:

$$Q_g^0 = V_g c_g^0 \theta_2^0 - V_g c_g^0 \theta_1^0 = V_g (c_g^0 \theta_2^0 - c_g^0 \theta_1^0) \text{ кал/сек.} \quad (29)$$

Имеем два уравнения с двумя неизвестными:

$$A_1^0 + B_0^0 = V \quad (30)$$

и

$$\frac{B_0^0 (c_0^0 \theta_1^0 - c_1^0 \theta_2^0)}{A_1^0 (c_1^0 \theta_1^0 - c_2^0 \theta_2^0)} = \frac{V_a (c_a^0 \theta_3^0 - c_a^0 \theta_1^0)}{V_g (c_g^0 \theta_2^0 - c_g^0 \theta_1^0)} \quad (31)$$

Решая уравнения, находим A_1^0 и B_0^0 .

Если нет достаточно хорошей изоляции регенераторов, в частности, стального кожуха или специальных обмазок, неизбежен приток в регенераторы внешнего воздуха. Разрежение в регенераторе значительно больше в период отходящих газов, и приток происходит главным образом в этот период. Его учесть, если в предыдущем выражении для Q_0^0 и Q_1^0 ввести коэффициент при B_0^0 и A_1^0 для выхода; например, при притоке в 20% количества проходящих газов:

$$Q_0^0 = B_0^0 c_0^0 \theta_1^0 - 1,2 B_0^0 c_1^0 \theta_2^0 \quad (32)$$

Правильность принятого распределения температур проверяется, как уже указано, тепловым балансом. Потери в окружающую среду должна составлять 5—10%. Ее можно определить специальным расчетом.

Коэффициент теплообмена

Современные методы расчета регенераторов базируются на законах теплопередачи и используют для расчета поверхности нагрева формулы теплообменников со стационарным тепловым потоком, причем вводится понятие коэффициента теплообмена, отнесенного к циклу — периоду, состоящему из фаз нагрева и охлаждения. В коэффициенте теплообмена учтены факторы, связанные с теплопередачей от газов к стенке, аккумуляцией тепла в кирпиче насадки и теплоотдачей от стенки к газам.

Коэффициент теплообмена определяется из выражения:

$$\varepsilon = \frac{1}{\frac{1}{\alpha^0 \theta^0} + \frac{1}{\alpha^e \theta^e} + \frac{2}{\delta \gamma \theta^0}} \text{ кал/период м}^2 \text{ град.} \quad (33)$$

где: α^0 — коэффициент теплоотдачи от дымовых газов к стенке в $\text{кал/м}^2 \text{ час град.}$;

α^e — коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху в $\text{кал/м}^2 \text{ час град.}$;

z^0 — продолжительность нагрева насадки в час;

z^e — продолжительность охлаждения насадки в час;

c — истинная удельная теплоемкость кирпича при его средней температуре в данном сечении регенератора в кал/кг град. ;

δ — толщина кирпича в м,

γ — объемный вес кирпича в кг/м³;

$\xi = \frac{\Delta t_2}{t_2 - t_1}^n$ — отношение максимальной разности температур поверхности кирпича к средней;

η — коэффициент использования насадки.

Как и в других случаях (см. стр. 151), можно принять:

$$\alpha^a = \alpha_k^a, \quad (34)$$

$$\alpha^b = \alpha_k^b + \alpha_n^b. \quad (35)$$

Для определения величин α^a и α_k^b можно использовать следующие выражения:

для насадки со смещенным расположением каналов:

$$\alpha_k = \frac{1,53 \alpha_0^a T^{0,25}}{d^{0,33}} \text{ кал/м}^2 \text{ час град.}, \quad (36a)$$

и с несмещенным расположением каналов:

$$\alpha_k = \frac{1,38 \alpha_0^a T^{0,25}}{d^{0,33}} \text{ кал/м}^2 \text{ час град.}, \quad (36b)$$

где: α_0 — скорость, отнесенная к нормальным условиям и минимальному проходному сечению (плоскости стыка рядов), в м/сек.;

d — приведенный диаметр ячейки (в плоскости стыка рядов) в м;

T — абсолютная температура в °К.

Площадь прохода газов в плоскости стыка двух рядов составляет на 1 м² площади насадки:

$$\frac{a^2}{(a + \delta)^2} \text{ м}^2. \quad (37)$$

Формулами (36-а) и (36-б) можно пользоваться при насадках с чередующимся расположением рядов:

α_n^a — определяется, как указано выше;

ξ и η — могут быть определены по рис. 52.

Значение ε вычисляют отдельно для верха ε^a и низа ε^b насадки.

Среднее значение ε определяется из выражения:

$$\varepsilon_{cp} = \frac{\varepsilon^a n + \varepsilon^b}{n + 1}. \quad (38)$$

Для воздушной насадки можно принять линейное изме-

нение величины ε и $n=1$. Для газовой насадки $n=1,25-1,75$, причем с уменьшением ε и поверхности насадки n уменьшается.

Поверхность нагрева

Величина поверхности нагрева может быть определена при рассчитанном значении ε для заданной незавершенности подогрева (рис. 46):

$$f = \frac{\theta_1^0 - \theta_1^*}{\theta_1^0 - \theta_1^*}, \quad (39)$$

или

$$f = \frac{\theta_1^0 - \theta_1^*}{\theta_1^0 - \theta_1^*}, \quad (40)$$

из выражения

$$\frac{\varepsilon F}{W_1^0} = \frac{KF}{W^0}. \quad (41)$$

Для учета потерь тепла регенераторами в окружающую среду следует уменьшать значение водяного эквивалента дымовых газов на 5—10%.

Определить поверхность нагрева насадки можно также по формуле:

$$F = \frac{Q_{ок}}{\varepsilon \Delta t} \text{ м}^2, \quad (42)$$

где: $Q_{ок}$ — количество тепла, отдаваемого воздуху (или газу) за время z часов (период) в кал;

Δt — средняя разность температур в град.;

ε вычисляется из выражений (33) и (38). Δt — из выражения (9).

$Q_{ок}$ представляет собой количество тепла, аккумулируемое насадкой в период нагрева и отдаваемое в период охлаждения.

Если длительности периодов нагрева и охлаждения равны, можно принять:

$$Q_{ок}^a = Q_a + \frac{Q_a^0 - Q_a}{2} = Q_a^0 - \frac{Q_a^0 - Q_a}{2}, \quad (43)$$

$$Q_{ок}^b = Q_b + \frac{Q_b^0 - Q_b}{2} = Q_b^0 - \frac{Q_b^0 - Q_b}{2}, \quad (44)$$

где: $Q_{ок}^a$ и $Q_{ок}^b$ — количества тепла, аккумулируемые соответственно воздушной и газовой насадками в период дымовых газов, в кал/период;

Q_a и Q_b — количества тепла, воспринимаемые соответственно воздухом и газом в период нагрева и охлаждения, в кал/период.

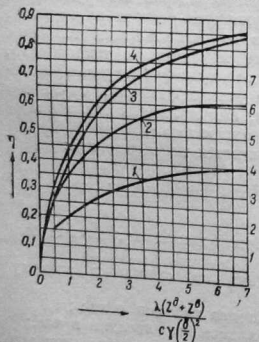


Рис. 52. Значение коэффициентов ξ и η . Для ξ : 1 — верх насадки, 2 — низ насадки. Для η : 3 — низ насадки, 4 — верх насадки.

Зависимость потерь вследствие трения от диаметра каналов при несмещенной насадке с чередующимся расположением рядов составляет:

$$h_{mp} = 0,162\gamma_0 \frac{w_0^2}{d^{0,25}} \frac{T}{B+b} l \text{ мм вод. ст.}, \quad (45)$$

где: d — гидравлический (приведенный) диаметр¹ каналов в м;
 B — барометрическое давление в мм рт. ст.;
 b — давление в камере в мм рт. ст.;
 l — длина цути для газов в м;
 w_0 — скорость газа, приведенная к нормальным условиям и отнесенная к плоскости стыка двух рядов (минимальное проходное сечение), в м/сек.;

T — температура газов в °К;

γ_0 — объемный вес газов при нормальных условиях в кг/м³.

Для насадки со смещенным расположением каналов:

$$h_{mp} = 0,224\gamma_0 \frac{w_0^2}{d^{0,25}} \frac{T}{B+b} l \text{ мм вод. ст.} \quad (46)$$

Местные сопротивления регенеративной насадки с чередующимся расположением рядов равны:

$$h_{\mu} = 1,5\pi \frac{w^2}{2g} \gamma \text{ мм вод. ст.}, \quad (47)$$

где: n — число рядов кирпича;

w — действительная скорость газа в м/сек.

Для насадок со сплошными каналами сопротивление можно подсчитать по обычным формулам для каналов.

4. КОТЛЫ-УТИЛИЗАТОРЫ

Котлы-утилизаторы устанавливаются у печей непрерывного действия больших размеров в случае, если тепло отходящих газов не используется для подогрева воздуха и газа или если температура их на выходе из воздухо- и газонагревателей излишне высока.

Установка котлов-утилизаторов рентабельна лишь в том случае, когда температура газов, поступающих в них, превышает 400°. В котле они охлаждаются до 180—200°.

Большее охлаждение в самом котле невыгодно ввиду значительного увеличения поверхностей нагрева, но допустимо в экономайзере. С повышением температуры газов, поступающих в котел, растет его производительность (табл. 11).

¹ Тот же, что и в формулах (36) и (37).

Количество пара, получаемого в котлах-утилизаторах

Температура отходящих газов в град.	Количество получаемого пара в кг на 1 кг (м ³) топлива		
	каменный уголь	мазут	природный газ
350	0,5—0,65	0,8—1,1	0,75—1,0
400	0,7—0,8	1,1—1,3	1,0—1,2
450	0,8—1,0	1,3—1,6	1,2—1,5
500	1,0—1,2	1,6—2,0	1,5—1,8

Рентабельность установки котлов-утилизаторов выявляется расчетом. При благоприятных условиях в них можно использовать 30—50% тепла отходящих газов, что составляет 8—15% потенциального тепла введенного топлива. Часть полученной экономии затрачивается на эксплуатацию и энергию для создания искусственной тяги. Стоимость энергии в установках для использования тепла отходящих газов составляет 10—15% и не превышает 30% стоимости пара.

В котлах-утилизаторах обычно получают пар невысокого давления в целях увеличения полезного перепада температур. Во избежание конденсации пара желательны перегревы его.

Наличие котла-утилизатора не исключает установки дополнительных котлов для покрытия недостатка в паре или в качестве резервных.

Котельная установка состоит обычно из котла, подогревателя и пароперегревателя (последние два не обязательны), питательных насосов и иногда дополнительной топки.

Пароперегреватели устанавливают в случае высокой температуры поступающих в котлы газов. Они располагаются в каналах для отходящих газов или в специальной коробке.

В целях достаточного снижения температуры отходящих газов за котлами устанавливают экономайзеры. Экономайзеры газотрубных котлов выполняют по образцу самих котлов и обычно располагают над ними. При водотрубных котлах применяются чугунные экономайзеры с гладкими трубами и автоматическими скребками или экономайзеры в виде секции котла.

Во избежание конденсации водяного пара на поверхности труб экономайзера, окисления их и образования серной или сернистой кислот, разъедающих трубы, температура воды, поступающей в экономайзер, должна быть выше точки росы для дымовых газов. Для этой цели воду подогревают, смешивая ее с некоторым количеством воды, отводимой из экономайзера, или нагревая при помощи отработанного пара.

Установку снабжают питательными насосами с паровым или двойным паровым и электрическим приводом.

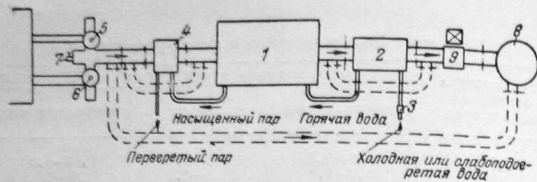


Рис. 53. Схема установки котла-утилизатора:

1—котел; 2—подогреватель; 3—насос; 4—пароперегреватель; 5—газовый клапан; 6—воздушный клапан; 7—дополнительная топка; 8—дымовая труба; 9—дымосос.

Для наиболее часто применяемых газотрубных котлов обычно устанавливают дымсос, предпочтительно прямого действия. Если можно использовать мягкий пар следует предпочесть привод дымососа от паровой турбины.

Для покрытия нагрузки в часы пик и получения пара при выключении печи устанавливают дополнительную топку, работающую на газовом или ином топливе. Дополнительную топку предпочитают отапливать газом. В этом случае ее легко регулировать, не требуется специального обслуживания по загрузке топлива и чистке и обеспечивается стабильный режим.

Постоянное использование в котле-утилизаторе добавочного отопления невыгодно ввиду низкой температуры газов, входящих в котел. Кроме того, при высоких температурах газов расширяются места развальцовки труб в газотрубных котлах и коробятся скребки в водотрубных.

Котлы-утилизаторы устанавливают возможно ближе к печи для уменьшения потерь тепла. Расположение котлов над производственными помещениями или под ними не допускается.

Отходящие газы должны проходить сначала пароперегреватель, потом котел и подогреватель. Движение газов через установку осуществляется за счет естественной или искусственной тяги. Газы движутся в противотоке с паром и водой. Температура газов должна значительно превышать температуру воды и пара в каждом участке. Предусматривается обводной канал для отвода газов помимо котельной установки, который дает возможность выключать котельную установку, который дает возможность газов. Рекомендуются устраивать отдельные обводные каналы для перегревателя и подогревателя, а также для дымососа при искусственной тяге. Схема установки котла-утилизатора представлена на рис. 53.

Дополнительную топку следует устанавливать таким образом, чтобы избежать взрыва при переводе клапана в случае образования взрывчатой смеси. Топку можно располагать между газовым и воздушным клапанами. Поступление газа в очаг высо-

кой температуры обеспечивает его сгорание в момент смешения с воздухом.

На обводных каналах и каналах между дополнительной топкой и котельной установкой устанавливают плотно закрывающиеся шиберы.

В аппаратуре и каналах предусматривают отверстия для чистки и предохранительные клапаны, открывающиеся при небольшом повышении давления.

В некоторых случаях для большей безопасности от взрыва, могущего возникнуть при переключении клапанов, котел-утилизатор устанавливают лишь на пути от воздушного клапана и не используют в нем газом, вышедших из газовых регенераторов.

Системы котлов. Отходящие из печи газы имеют низкую температуру, поэтому при утилизации их тепла в целях получения пара могут быть использованы лишь котлы с хорошо развитой поверхностью — газотрубные и водотрубные. Преимущественно применяют газотрубные котлы, как более плотные.

Газотрубные котлы (рис. 54) обычно горизонтальные и без оборотов. Диаметр котла 2—2,5 м, длина — до 6 м. Газы из входной камеры проходят по большому количеству (100—400) стальных цельнотянутых труб небольшого диаметра (54—70 мм внутренний, толщина стенки 3 мм) и собираются в выходной камере. Газы движутся в один или два оборота. При проходе в два оборота теплопередача особенно интенсивна, но потеря давления рота теплопередача особенно интенсивна, но потеря давления большая. Концы труб развальцовывают в днищах котлов. Пучки труб иногда делают выдвижными, чтобы можно было их чистить (внутри — от сажи, снаружи — от грязи и накипи). Иногда устраивают лючки для доступа к отдельным трубам изнутри. Это дает возможность чистить их во время работы. При слишком малом расстоянии между трубами чистка затруднена. Газотрубные котлы имеют большое сопротивление — от 30 до 80 мм вод. ст., и при их установке предусматривается искусственная тяга (расход их энергии 6—12 квтч на 1 т пара). Вследствие больших скоростей газов (6—15 м/сек.) при нормальных условиях котлы допускают значительное напряжение поверхности нагрева. Это обстоятельство, а также отсутствие футеровки, делает их компактными. Монтаж газотрубных котлов проще, чем водотрубных. Они не требуют такой тщательной очистки воды, как водотрубные. Водотрубные котлы состоят из вертикальных или наклонных труб с внутренним диаметром 50—95 мм и барабанов. Трубы

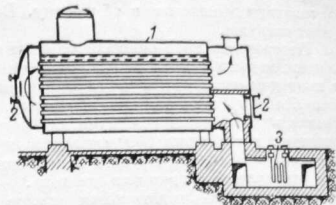


Рис. 54. Газотрубный котел:

1—двухходовой котел; 2—предохранительный клапан; 3—пароперегреватель.

и газоходы заключают в обмуровку. Верхний барабан располагают снаружи.

Поверхность труб очищают от пыли и сажи скребками, медленно опускающимися и поднимающимися при помощи цепей с приводом от мотора и червячной передачи. Применение скребков более эффективно, чем обдувание. Недостатком является присос воздуха через отверстия для подъемных цепей. При температуре газов выше 500° скребков не применяют вследствие коробления. Газы движутся в поперечном по отношению к трубам направлении в один или два хода.

Сопротивление водотрубных котлов небольшое — 2—6 мм вод. ст. Они допускают использование естественной тяги. Несмотря на это, применение водотрубных котлов при получении пара давлением до 15 атм значительно меньше распространено, чем газотрубных. При давлении пара выше 15 атм водотрубные котлы более пригодны ввиду легкого расстройство мест вальцовки труб в газотрубных котлах.

Расчет количества тепла, отдаваемого продуктами горения, производится с учетом их состава и температуры. Количество получаемого пара определяют по его теплоте нагрева с учетом потери тепла установкой в окружающую среду.

Скорость продуктов горения в каналах принимается равной 6—8 м/сек. Поверхности нагрева и сопротивления определяют по формулам, приводимым в курсах теплопередачи и котельных установок.

5. ДРУГИЕ СПОСОБЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛА

Тепло газов, вышедших из регенераторов и рекуператоров, может быть использовано в водоподогревателях и приспособлениях для подсушки материалов.

Водоподогреватели применяют в случаях низкой температуры отходящих газов и нерентабельности установки котла-утилизатора, а также при необходимости упрощения утилизационной установки.

В качестве водоподогревателей применяют гладкие или ребристые трубы. В водоподогреватель подается питательная вода, нагретая до температуры точки росы дымовых газов.

В ряде случаев очень важно использовать тепло отходящих газов для искусственной сушки топлива (древесины, торфа). Печи часто работают при пониженном температурном режиме, с уменьшенной производительностью и огромным перерасходом топлива вследствие отпления очень влажным топливом. Теплоты отходящих газов обычно достаточно для подсушки древесины и торфа до содержания влаги 25—35%, при которой печи работают успешно.

При искусственной сушке топлива во избежание загорания топлива, для этой цели применяют газы с температурой 150—160°.

Глава восьмая

ГАЗОПРОВОДЫ И КЛАПАНЫ

Горючие газы, воздух и дымовые газы транспортируют по газопроводам.

Газопроводы снабжают клапанами, с помощью которых производится включение, регулирование и предупреждается разрушение газопроводов при взрыве.

1. ГАЗОПРОВОДЫ

Газопроводы для очищенного газа

Очищенный почти полностью от взвешенных частиц и охлажденный газ транспортируют по металлическим нефутерованным газопроводам. Они большей частью выполняются сварными из листового стали толщиной 6 мм и больше. Обычно эти газопроводы — надземные, подвесные и располагаются на стальных или бетонных стойках.

Газопроводы очищенного высококалорийного газа к пеху-потребителю часто делают подземными. При давлениях до 200 мм вод. ст. их изготовляют как из стали, так и из чугуна. Для более высоких давлений применяют почти исключительно стальные трубы.

Подземные газопроводы для очищенного газа прокладывают также глубины промерзания грунта во избежание замерзания конденсата.

Газопроводы очищенного газа рассчитывают на скорость 6—12 м/сек., а при малых производительностях — на меньшую.

Газопроводы для неочищенного газа

Для транспорта неочищенного газа с температурой выше 300° применяют металлические футерованные или кирпичные газопроводы. Внутренняя кладка делается из огнеупорного кирпича. Эти газопроводы снабжают пылеуловителями и мешками для сбора конденсата и спуска его на ходу.

Для транспорта газа с низкой температурой (из влажных топлив) можно применять металлические нефутерованные газопроводы. В случае выделения конденсата газопроводы снабжают

спускными трубами, погруженными в гидравлические затворы (горшки), из которых осадки могут быть удалены на ходу.

Чтобы можно было чистить газопроводы, их снабжают люками. Кирпичные газопроводы (обычно подземные) применяют лишь для транспорта смолистого газа низкого давления во избежание выбивания газа (потери, опасность отравления и взрыва) или присоса воздуха (опасность взрыва или сгорания газа). Кирпичные газопроводы делают прямоугольными. Свод обычно очерчивают по дуге, радиус которой равен ширине канала.

При температуре ниже 1100° огнеупорную футеровку выполняют из шамота, при более высоких температурах применяют также диас, причем нередко используют фасонный крупный кирпич.

Потеря тепла кирпичными газопроводами невелика—при температуре газа $300-600^{\circ}$ падение температуры составляет $2-3,5^{\circ}$ на 1 м.

Кирпичные газопроводы рассчитывают на скорость $0,5-1,0$ м/сек. (при 0°). В металлических газопроводах неочищенного газа принимают скорости $1-2$ м/сек. при 0° .

2. ВОЗДУХОПРОВОДЫ

Воздухопроводы служат для подачи воздуха для горения и охлаждения печей и продукта.

Воздух может подаваться в печь за счет геометрического напора (тяги) печи или принудительно, преимущественно нагнетанием. К нагнетанию прибегают при использовании в печи подогретого воздуха или отсасываемого из помещения в целях вентиляции, а также при большом сопротивлении топок, регенераторов и рекуператоров. Применение металлических рекуператоров почти всегда обуславливает необходимость нагнетания воздуха.

Металлические воздухопроводы обычно делают сварными из 3-мм или более тонкого железа. Скорости в них принимают $4-12$ м/сек. (при 0°). При невысоком подогреве требуется наружная изоляция воздухопроводов. В случае подогрева воздуха выше 400° воздухопроводы футеруют и изолируют изнутри. Для подачи воздуха, подогретого до очень высоких температур—выше $500-600^{\circ}$, применяют также воздухопроводы из огнеупорных материалов (шамота и диаса).

Воздухопроводы от переводных клапанов к регенераторам обычно делают подземные кирпичные и футеруют изнутри огнеупорным кирпичом (в подкирпич).

3. ДЫМОВЫЕ КАНАЛЫ

Дымовые каналы или борова¹ обычно представляют собой кирпичные газопроводы, соединенные с дымовой трубой, которая может быть металлической.

¹ Дымовым боровом называется газопровод для дымовых газов, в котором нет полезной передачи тепла. В каналах перед регенераторами тепло, их не следует называть боровами.

Устройство этих каналов не отличается от устройства кирпичных подземных газо- и воздухопроводов. При низкой температуре дымовых газов дымовой боров у трубы целиком выполняется из красного кирпича.

4. КЛАПАНЫ

Виды клапанов

Различают клапаны для включения (выключения) газов, для регулирования количества газов, предохранительные и переводные.

Изменение количества протекающего газа производится клапанами, служащими для включения и выключения газа, если только ими можно достаточно легко и быстро управлять и регулировать подачу газа.

Предохранительные клапаны разделяются на две подгруппы: клапаны, предупреждающие разрушение газопровода при чрезмерном повышении давления, и клапаны, предупреждающие проникновение газов из одного участка в другой. Последние клапаны часто называют обратными.

По форме различают клапаны плоские (шиберы), в виде клин-ев (завдвижки), тарельчатые и т. д.

Уплотнение клапанов применяется сухое и гидравлическое. Сухое уплотнение создается взаимным прижимом поверхностей. Степень плотности зависит от обработки и состояния поверхностей, чистоты и разъедающего действия газа, прижима плоскостей, давления и температуры газа и т. д.

В клапанах с гидравлическим уплотнением (затвором) плотность достигается сравнительно легко. Применение их затруднено при высоком давлении воды и охлаждении газа.

В гидравлических затворах с погружением имеются постоянно погруженные в воду поверхности, создающие затвор. В гидравлических разделительных затворах заливают водой проход для газа только при выключении газопровода.

Глубина погружения затворов в воду должна быть в 2—3 раза больше высоты столба воды, соответствующего давлению газа, ввиду суммирования при изменениях давления волн давления и сильных колебаний уровня воды даже при отсутствии взрыва. За исключением тарельчатых гидравлические клапаны обычно не применяются в качестве регулирующих подачу газа.

Гидравлические клапаны часто одновременно служат в качестве предохранительных.

Клапаны для включения, выключения и регулирования

Простейшим клапаном для включения, выключения и регулирования является шибер. При вертикальном положении он

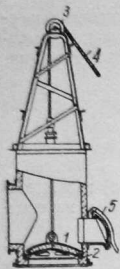


Рис. 55. Тарельчатый клапан с сухим уплотнением:
1—тарелка, 2—седло, 3—блок, 4—трос, 5—предохранительный клапан.

не обеспечивает плотности вследствие наличия щелей у краев. При значительном давлении газа шиберы не применяются.

Если газ имеет низкую температуру, шиберы изготовляют из 2—4-мм стали. При температурах выше 200—300° применяют 4—6-мм стальные или 12—20-мм чугунные шиберы. При температурах выше 600° шиберы изготовляют из огнеупорного материала, обычно шамота.

После каждого передвижения шибера требуется промазывать или заклеивать щели между шибером и кладкой канала. Для устранения присоса шиберы закрывают в металлические и кирпичные футляры. При применении футляров присос воздуха возможен только через небольшую щель между тросом подвески и футляром. В случае больших размеров шиберы дымовых ходов уравновешивают противовесами и перемещают с помощью блоков.

Более удовлетворительное уплотнение может быть достигнуто тарельчатыми клапанами (рис. 55), применяемыми для включения, выключения и регулирования.

Клапан состоит из чугунной тарелки с конической боковой поверхностью, прижимаемой к чугунному седлу-кольцу. Тарелка подвешена на штоке и связана с ним шарниром или же болтом, или чекой. Тарелку поднимают рукой или лебедкой с помощью троса, перекинутого через блок, или с помощью колодки с винтом и маховичком. При высоких температурах газа тарелки и седла изготовляют из жароупорного чугуна.

При невысокой температуре газа тарельчатые клапаны могут быть снабжены гидравлическими затворами.

Тарельчатые клапаны устанавливают у печей, питаемых неочищенным газом в местах перехода вертикальных каналов в горизонтальные.

Для включения и выключения газа, преимущественно не очень высокой температуры и находящегося под незначительным давлением (до 100—300 мм вод. ст.), кроме тарельчатых клапанов применяют гидравлические затворы.

В металлических газопроводах для очищенного газа устанавливают также тарельчатые вентили и клиновидные задвижки водяных.

Предохранительные клапаны

Сила взрыва, получающегося в газопроводе при воспламенении взрывчатой смеси, воспринимается преимущественно торцевыми частями газопровода, где и устанавливают предохранительные клапаны соответствующих размеров, которые одновременно служат и для чистки газопроводов и в качестве лазов. В случае

взрыва предохранительный клапан должен открыться, выпустить воспламенившуюся смесь и при понижении давления закрыть отверстие, соединяющее газопровод с атмосферой, во избежание присоса воздуха и повторения взрыва.

Часто применяют металлические предохранительные клапаны-хлопушки (рис. 56), которыми пользуются также при чистке газопроводов для удаления смолы и пыли.

В качестве предохранительных применяют и гидравлические клапаны. В гидравлическом клапане вода выплескивается при взрыве и, быстро принимая горизонтальную поверхность, заменяет откидную крышку. Для того, чтобы подобный клапан был вполне безопасен, в нем после взрыва должно оставаться достаточное количество воды, и должен быть обеспечен приток воды к нему.

Предохранительные клапаны, служащие в то же время и для чистки газопроводов, всегда ставят у затворных клапанов и в местах поворотов газопроводов.

Предохранительными являются также обратные клапаны, самостоятельно выключающие потребителя, когда давление газа падает. Гидравлический обратный клапан представлен на рис. 57. Газ подается под значительным давлением и, преодолевая сопротивление гидравлического затвора и пробужливая через воду, отводится к потребителю. В случае падения давления газа вода выключает газопровод к потребителю. Если давление в принимающем газопроводе превысит давление в подающем, уровень воды в затворе понижается, так как она выдвигается в подающей газопровод. Благодаря большой величине соотношения площадей коробки затвора и подающего газопровода, даже при незначительном понижении уровня воды в затворе, в подающем газопроводе быстро образуется столб большой высоты, препятствующий обратному прохождению газа.

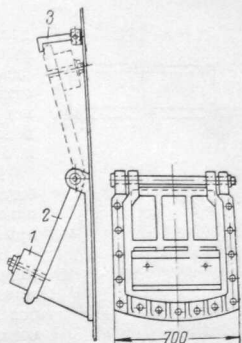


Рис. 56. Предохранительный клапан-хлопушка:
1—пружина, 2—крышка, 3—свесоба, удерживающая клапан в поднятном положении.

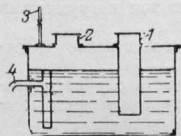


Рис. 57. Предохранительный обратный клапан:
1—подающий газопровод; 2—отводящий газопровод; 3—подводящая вода; 4—отвод воды.

Переводные клапаны

Для периодического изменения направления движения газов в регенеративных печах применяют переводные клапаны.

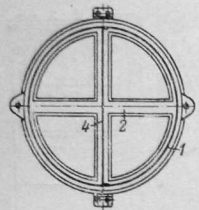
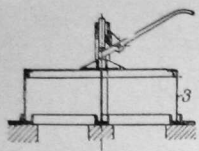


Рис. 58. Переводной барабанный четырехходовый клапан:

1—чугунное кольцо; 2—крестовина; 3—барабан; 4—перегородка.

Переводные клапаны можно подразделить на две группы: простые клапаны, включающие или выключающие подачу одного вида газа (воздуха, горючего газа, отходящих газов) и сложные клапаны, одновременно переключающие подачу двух видов газов (воздуха—или горючего газа и отходящих газов).

Простые клапаны представляют собой отдельные шиберы или тарельчатые клапаны, одновременно перекрывающие и открывающие соответствующие каналы.

Барабанный сложный клапан, применяющийся для переключения направления горючего газа и дымовых газов, представлен на рис. 58. Он состоит из чугунного кольца 1, имеющего желобчатую форму и снабженного желобчатым же крестом 2, и стального барабана 3 с перегородкой 4 по диаметру. Кольцо с крестом—крестовина—образует четыре отделения в кирпичной кладке, соединяющих каналы в кирпичной кладке, соединяющих газопроводы с газопроводом горючего газа и дымовой трубой.

В крестовину наливается вода, и барабан устанавливается в кольцевом желобе таким образом, что его перегородка входит в один из двух желобов, образующих крест. Погруженные в воду барабан и перегородка образуют гидравлический затвор, герметически разделяющий барабан на две части. В одной половине барабана газопровод от газогенераторов оказывается соединенным с регенератором, подающим газ в печь, в другой половине регенератор, отводящий дымовые газы, соединяется с дымовой трубой. Для переключения направления движения газов барабан поднимают настолько, чтобы перегородка, не доходящая до его основания, вышла из желоба, затем поворачивают его на 90° и опускают. При этой операции барабан остается погруженным в воду.

В период переключения газопровод непосредственно соединяется с дымовой трубой.

Барабанный клапан может быть неплотным в случае прогорания перегородки в барабане или неплотного прилегания крестовины к кладке.

Площадь хода в самом барабане должна быть не меньше площади входного отверстия в крестовине.

Глава девятая КЛАДКА И ОБВЯЗКА ПЕЧЕЙ

1. КЛАДКА ПЕЧЕЙ

Кладка служит для ограждения рабочего пространства печи и газовых потоков.

Выбор материала для кладки печи зависит от температурного режима печи, взаимодействия его с нагреваемыми материалами и требуемой экономичности.

Применяют огнеупорные, неогнеупорные и термоизоляционные материалы.

Кладка низкотемпературных печей ведется из красного, изредка из силикатного кирпича, а иногда из бетона и дерева. При температурах выше 400—500° внутреннюю кладку ведут из огнеупорного кирпича. При совпадении швов, ее через несколько рядов перевязывают с наружной. Кладка рабочей камеры высокотемпературных печей, например, стекловаренных, подвергаясь сильному износу, ведется только из огнеупорного кирпича. Для уменьшения количества швов взамен кирпичей применяют крупные брусья.

Кладка печи должна быть плотной, чтобы печные газы не выделялись наружу, а воздух не присасывался внутрь печи. Выделение газов вызывает потерю тепла и обгорание связей; кроме того, оно ухудшает условия обслуживания. Присос воздуха понижает температуру газов, вызывает сгорание горючих газов и увеличивает сопротивление на пути газов.

Щели, образующиеся между кирпичами, заполняют раствором.

Раствор для огнеупорной кладки должен быть достаточно огнеупорным, химически стойким и пластичным. Коэффициенты расширения раствора и кирпича должны быть близки друг к другу. Раствор должен давать малую усадку и хорошо связываться с кладкой. Для огнеупорной кладки обычно используется раствор из огнеупорной глины и отощающего вещества, соответствующего материалу кладки. Для красной кладки, работающей при температуре выше 300—400°, применяют раствор из глины и песка.

Если требуется повышенная плотность, кладку закладывают в стальной коух или покрывают снаружи специальными обмазками.

Кладка ведется из кирпичей нормальных размеров и крупных, а также из фасонного припаса. При отсутствии огнеупорного

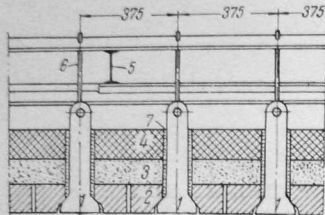


Рис. 59. Подвесной свод туннельной печи:
1 — корундовые подвески; 2 — динасовые плиты;
3 — динасовый легковес; 4 — трехслойный кирпич
печ; 5 — бабка для подвески свода; 6 — стальные кирпич
подвески; 7 — засыпка.

кирпича иногда делают навивную кладку. Такая кладка требует длительной сушки и осторожного нагрева.

Своды печей и каналов обычно выкладывают по дуге окружности. В ответственных местах кладка печных сводов ведется в один огнеупорный кирпич и в менее ответственных участках с пониженной температурой в два переката по половине кирпича (один огнеупорный, второй красный). При больших пролетах применяют кирпич большой высоты.

Подъем свода обычно составляет 1/8 пролета (радиус очерчивающей дуги свода равен ширине канала), а иногда и больше. При сильном росте свода принимает меньший подъем.

Напряжения, возникающие в своде, возрастают с увеличением размеров кирпича. Наибольшей величины они достигают при монолитном своде.

С целью получения плотной кладки кирпичи подтесывают, что ослабляет кладку. Кладку сводов ведут из клинового кирпича иногда попеременно с прямыми.

Ответственные своды выкладывают предварительно насухо на кружалах, тщательно подбирая кирпичи. Затем уже ведут кладку на растворе, начиная ее от пят. Кладку цилиндрических сводов производят продольными рядами, а сферических кольцевыми кирпичами. Для уменьшения напряжений при больших пролетах и удобства ремонта нижележащей кладки, а также уменьшения подъема свода, подвешивают отдельные элементы и целые

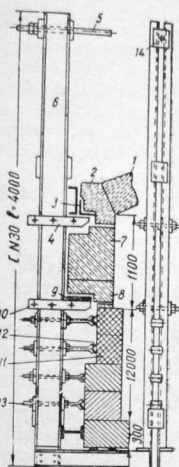


Рис. 60. Подвесной свод стекловаренной печи:
1 — свод; 2 — плита; 3 — опора
плит; 4 — крошители для под-
вески свода; 5 — сталь; 6 —
колонна печи; 7 — стена пла-
менного пространства; 8 —
опорный брус стены (стл);
9 — металлическая опорная
плита; 10 — крошители для
подвески стелы; 11 — брусья
бассейна; 12 — уголок об-
вязки бассейна; 13 — упор-
ный болт; 14 — приварен-
ная планка.

На рис. 59 показан свод высотой температурной туннельной печи с подвешенными элементами конструкции Гипроогнеупора. На рис. 60 показаны подвесной свод и кладка стекловаренной печи.

2. ТЕПЛОВАЯ РАБОТА КЛАДКИ

Работа кладки зависит от распределения в ней температур, характеризующего теплообмен кладки в рабочем пространстве, возникающие напряжения, пластические деформации, потери тепла в окружающую среду и стойкость кладки.

При отрицательном давлении в рабочем пространстве через кладку присасывается воздух, понижающий ее температуру. При положительном давлении в рабочем пространстве через кладку просачиваются печные газы, нагревающие ее. Тепло, передаваемое кладке, в печах непрерывного действия теряется наружу. Количество этого тепла и температура внешней поверхности стены могут быть определены по рис. 64. В печах периодического действия часть тепла аккумулируется кладкой и отдается ею в период охлаждения; распределение температур в кладке и количество отданного наружу и аккумулированного тепла могут быть определены методом конечных разностей (см. главу III).

На рис. 61 показано распределение температур в своде непрерывно действующей стекловаренной печи при наличии и отсутствии тепловой изоляции. Из рисунка видно влияние тепловой изоляции на распределение температур, а следовательно, и на потерю тепла в окружающую среду. Материал каждого слоя свода должен по своим свойствам соответствовать температурному интервалу, в котором этот слой работает.

Количество тепла, аккумулируемого кладкой печей периодического действия, возрастает с увеличением веса кладки, что определяет дополнительную выгоду тепловой изоляции.

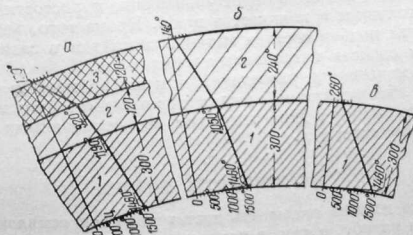


Рис. 61. Распределение температур в своде стекловаренной печи:
а и б — изолированный свод; в — свод неизолированный; 1 —
динас; 2 — шамотный легковес; 3 — трехслойный кирпич.

Большое количество тепла теряется в окружающую среду в тех местах, где кладка тонкая. Люки и лазы следует надлежащим образом утеплять путем футеровки заслонок, закладывая в отверстия кирпичом и т. д.

В случае возможности резких изменений температур, кладка должна быть достаточно термостойка.

При нагревании кладка расширяется до тех пор, пока материал не становится пластичным. Величина расширения зависит от многих причин, в частности, от распределения температур в кладке, коэффициента расширения материала кладки, размеров швов и свойств материала, их заполняющего, размеров и состояния кладки и способа обвязки печи.

Швы в известной мере компенсируют расширение кладки, т. е. уменьшают суммарную величину расширения.

Во избежание значительного изменения размеров кладки, в ней предусматривают специальные температурные швы. Иногда в стадии производства кладки швы закладывают материалом, выгорающим при пуске печи, например, деревянными досками. На случай расширения кладки часто предусматривают возможность ослабления натяжения связей, стягивающих колонны обвязки.

3. РАЗЪЕДАНИЕ КЛАДКИ

Во многих случаях кладка подвергается разъедающему действию нагреваемого в печи материала, который взаимодействует с материалом кладки. Большое значение имеет проникновение в швы, трещины и поры кладки жидких веществ (стекломассы, шлака). Последние реагируют с материалом кладки и затем вытекают наружу, а на их место поступает свежий расплав. Пористость материала способствует его разъеданию также вследствие увеличения поверхности раздела фаз.

Для печей, в которых кладка подвержена разъедающему действию, особенно значение имеет уменьшение пористости материала, а также толщины и количества швов. Кроме того, весьма важен правильный подбор состава материала кладки в зависимости от состава и свойств нагреваемых материалов.

Для уменьшения разъедания кладки применяют также специальные обмазки или набивки футеровки из стойких материалов, охлаждают кладку и даже заменяют ее охлаждаемыми металлическими поверхностями.

4. ПРОЧНОСТЬ КЛАДКИ

Кладка должна оказывать достаточное сопротивление сдвигу, сжатию и изгибу, а также истирающим усилиям. Сопротивление сдвигу зависит от сцепления раствора с кирпичами и величин сил, сжимающей кирпичи. С помощью неспекшегося обычного огнеупорного раствора достигается малое сцепление. Спекание

раствора значительно увеличивает его прочность. Известковые и смешанные растворы увеличивают сцепление красной кладки. Однако при повышении температуры до 200—300° эти растворы, так же как и бетонная кладка, разрушаются. В печной кладке не должны возникать разрывающие усилия. При наличии их кладка может опрокинуться.

Высота самостоятельно стоящих стен печной кладки не должна превышать их пятикратной толщины. Увеличение соотношения допускается при перевязке таких стен с другими.

Напряжения сжатия от собственного веса кладки вообще невелики. Однако неравномерность нагрузки и распределения температур, а также наличие пластических деформаций в отдельных частях кладки могут значительно увеличить эти напряжения.

Образование трещин в кладке является обычно следствием появления напряжений, возникающих при резком изменении температуры отдельных участков кладки, структурных изменений в материале кладки и излишне интенсивной сушки. Иногда трещины вызываются сжатием, связанным с расширением части кладки.

5. ОГНЕУПОРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Качество изделий, срок службы и производительность печей в значительной мере зависят от применяемых огнеупорных материалов.

Под огнеупорными понимают материалы, способные выдерживать температуры не ниже 1580° не расплавляясь. Огнеупорные материалы делятся на две группы:

- 1) обычные, огнеупорность которых не превышает 1770°;
- 2) высокоогнеупорные, огнеупорность которых выше 1770°.

Главнейшими представителями первой группы являются шамот и динас.

Главнейшие высокоогнеупорные материалы изготавливают из веществ, состоящих в основном из SiO_2 , Al_2O_3 и MgO , а также содержащих некоторые количества изделия из графита, карбидов и нитридов некоторых металлов и металлоидов и окислов редких элементов.

Характеристика основных огнеупорных и высокоогнеупорных материалов приведена в табл. 12.

Помимо способности выдерживать высокие температуры не расплавляясь, к огнеупорным материалам для кладки печей обычно предъявляются требования в отношении: 1) постоянства объема при высоких температурах; 2) сохранения строительной прочности под нагрузкой при высоких температурах; 3) химической стойкости; 4) термической стойкости.

Прочность под нагрузкой

Огнеупорные изделия обладают свойством размягчаться и деформироваться при нагревании до температур ниже точки

Свойства огнеупорных

Таблица 12

и теплоизоляционных материалов

Материал	Объемный вес в кг/м ³	Теплоемкость от 0 до t° или при t° в кал/кг град.	Коэффициент теплопроводности в кал/м час град.
Шамотные изделия . .	1800—2100	0,20+63·10 ⁻⁸ ·t	0,6+55·10 ⁻⁸ ·t
Диасовые изделия . .	1700—2000	0,19+80·10 ⁻⁸ ·t	0,7+65·10 ⁻⁸ ·t
Карборундовый огнеупор	2100—2500	0,18 (при 20°)	8,0+150·10 ⁻⁸ ·t
Магнезит	2560—2650	0,225+60·10 ⁻⁸ ·t	5,3—230·10 ⁻⁸ ·t
Высокоглиноземистые изделия	2000—2500	0,20 (при 20°)	—
Муллит плавленный . .	2160—2900	—	—
Хромомagneзит	2900—3100	0,18+36·10 ⁻⁸ ·t	1,4 (при 50°); 1,34 (при 400°)
Графитовые изделия . .	1800	0,16	8,94
Цирконовые и циркониевые изделия	2100—2200	—	—
Красный кирпич	175 (слабо обожженный), 210 (сильно обожженный)	0,20 (при 330°)	0,4+44·10 ⁻⁸ ·t
Бетон (1:2:5)	2400	0,156 (при 80°), 0,219 (при 400°)	0,79
Кизельгуровый кирпич	400—500	0,18 (при 550°)	0,10+10·10 ⁻⁸ ·t
Пористый асбест	202	0,0738 (при 70°)	0,122 (при 300°)
Шамотный легковес . . .	810—1340	—	0,15—0,28
Пеностекло	190—500	—	0,09—0,12
Диасовый легковес . . .	690—1000	—	0,22—0,41

Огнеупорность в град.	Предел прочности при сжатии в кг/см ²	Термическая устойчивость	Химическая устойчивость	
			основные шлаки и окислы	кислые шлаки и окислы
1580—1750	100—800	от удовлетворит. до хорошей	плохая	удовлетворительная
1690—1730	150—350	плохая	то же	отличная
1850—1900	400—680	отличная	»	удовлетворительная
> 2000	300—500	очень плохая	отличная	плохая
1750—1900	400—800	от удовлетворит. до хорошей	удовлетворительная	отличная
1820—1960	> 1000	плохая	отличная	то же
1900—2100	250—800	от плохой до удовлетворит.	то же	удовлетворительная
>2000	100—300	хорошая	—	—
2000—2500	150—500	от удовлетворит. до хорошей	удовлетворительная	отличная
—	100—125	—	—	—
—	—	—	—	—
—	—	—	—	—
—	—	—	—	—
1380—1430	22—67	—	—	—
—	20—40	—	—	—
1600—1700	20—40	—	—	—

плавления. Так как обычно огнеупорные кирпичи работают на сжатие, и давление в кладке не превышает 2 кг/см^2 , то температуру деформации определяют при нагрузке в 2 кг/см^2 .

Деформация шамотных кирпичей начинается обычно при $1300\text{--}1400^\circ$ и они теряют строительную прочность около 1500° . Динасовы кирпичи начинают деформироваться только при $1600\text{--}1650^\circ$ и быстро теряют прочность. Поэтому динас может быть применен для кладки свода высокотемпературных печей, а шамот непригоден для этой цели.

Химическая стойкость

Химическая стойкость огнеупорного материала определяется его составом и структурой (пористостью), размерами кирпичей и качеством кладки. В ряде случаев мероприятия, способствующие увеличению продолжительности срока службы кладки, сводятся к применению возможно более крупных брусьев в целях получения минимального количества швов, плотной кладки и искусственного охлаждения.

Термическая стойкость

Под термической стойкостью огнеупорного материала подразумевается способность его выдерживать резкие колебания температуры не разрушаясь и не растрескиваясь.

Термическая стойкость огнеупорного материала зависит от его структуры, коэффициента линейного расширения и теплопроводности.

Шамот обладает хорошей термической устойчивостью. Динас требует более медленного нагревания и охлаждения, ввиду происходящих при этом полиморфных превращений кремнезема, сопровождающихся изменениями объема.

Значительной термической стойкостью обладают некоторые сорта высокоглиноземистого огнеупорного материала.

Постоянство объема при высоких температурах

Помимо обычного обратного расширения, огнеупорные материалы при нагревании могут претерпевать структурные изменения; в частности, шамот дает усадку, а динас расширяется. У шамотных кирпичей усадка до некоторой степени компенсируется термическим расширением.

У динасовых кирпичей оба вида деформации суммируются, что обуславливает его сильное расширение при нагревании.

Величина деформации усадки и расширения огнеупорных изделий зависит от качества и степени их обжига. Достаточно высокая температура обжига обеспечивает минимальное дополнительное изменение объема материала в печи.

Динас

Динасовыми называются огнеупорные изделия, содержащие не менее $90\% \text{ SiO}_2$ и обожженные настолько, что кремнезем их находится полностью или большей частью в виде тридимита и кристобалита. Удельный вес хорошего динаса не превышает $2,38\text{--}2,40$.

Наиболее интенсивно динас расширяется при температурах ниже 600° .

Динас применяется для кладки стен пламенного пространства, сводов и частично горелок печей, так как он сохраняет прочность при высокой температуре и деформируется под нагрузкой лишь вблизи точки плавления.

Шамот

Шамотными называются огнеупорные изделия из смеси пластической огнеупорной глины и отожающего огнеупорного вещества — шамота (обычно обожженной огнеупорной глины), содержащие не менее $30\% \text{ Al}_2\text{O}_3$. С повышением температуры до определенных пределов шамотный кирпич расширяется. При 700° расширение достигает 9 мм на 1 м .

Полуокислый материал

В некоторых случаях применяют полуокислые изделия, изготовляемые из глин или каолинов с высоким содержанием SiO_2 или из смеси песка и глины ($30\text{--}50\%$ глины и $70\text{--}50\%$ песка). Их быстро высушивают и используют в виде сыра.

При изменении температуры полуокислые изделия не дают ни расширения, ни усадки. Несмотря на достаточную огнеупорность, этот материал редко применяется вследствие его небольшой химической и механической прочности.

Песчаник

Естественный песчаник применялся до появления шамота и динаса. Он представляет собой зерна кварца, цементированные кремнеземом и другими веществами. При нагревании песчаник расширяется. При красном калении линейное расширение незначительно, при 575° оно составляет, примерно, $0,5\%$, а при $1200\text{--}1400^\circ$ — $4\text{--}5\%$.

Магнетит

Магнетитовые изделия содержат до $95\text{--}96\% \text{ MgO}$. Они обладают высокой огнеупорностью, плотностью и прочностью и высокой химической устойчивостью по отношению к материалам основного характера, в частности, портуландцементу. В чистом виде магнетитовый кирпич редко используется в силикатной промышленности вследствие его недостаточной термической устойчивости.

При добавке к магнезитовому порошку хромистого железняка получают хромомagneзитовый материал, имеющий при определенных условиях высокую термическую устойчивость. Хромомagneзитовый кирпич применяется для футеровки вращающихся печей для обжига портландцемента.

Тальк

Тальк — минерал, состоящий в основном из кремнезема и магнезии. Он имеет высокую температуру размягчения (около 1400°) и довольно высокую огнеупорность (1500—1600°). Естественный тальк мягок и из него выпиливают кирпичи. После обжига они приобретают значительную твердость.

Тальк обладает высокой термической прочностью и очень стоек в отношении воздействия шлаков и многих реагентов. Он иногда применяется в качестве футеровки вращающихся печей для обжига портландцементного клинкера и других печей.

Клинкерный бетон

Клинкерный бетон, применяемый для футеровки вращающихся печей для обжига портландцементного клинкера, изготавливается из мелкого портландцементного клинкера (65—75%) и молотого цемента (35—25%) без обжига. Клинкерный бетон легко истирается и быстро разрушается при изменении температуры.

Высокоглиноземистые материалы

Из высокоглиноземистых материалов в промышленности получили распространение муллитовые и корундовые. С увеличением содержания Al_2O_3 огнеупорность алюмосиликатного материала повышается. Кирпич, содержащий 50% Al_2O_3 , начинает размягчаться при температуре 1785°, а изготавливаемый из чистого Al_2O_3 — около 1800°.

Муллитовые огнеупорные изделия получают методом электроплавки высокоглиноземистого сырья и состоят в основном из того количества стекловидной фазы, частично корунда и небольшой нагрузки — 1750°, объемный вес — 2,7—3,3 г/см³, пористость — менее 1,0%, коэффициент теплопроводности — 2,5 кал/м час град, коэффициент термического расширения 60—20·10⁻⁶. Муллитовый огнеупор с добавкой компонентов, содержащих цирконий и с пониженным содержанием Fe_2O_3 , обладает повышенной термической и химической стойкостью.

Силлиманитовые огнеупорные изделия изготавливаются из минералов ряда силлиманита ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$) способом пневматического трамбования, с последующим обжигом при температуре не ниже 1600°. Они обладают значительной прочностью и огнеупорностью.

Корундовый огнеупор представляет собой плавильный чистый глинозем с добавкой окиси хрома. Он более устойчив, чем муллитовый огнеупор.

Муллитовые и силлиманитовые материалы применяются в частности для кладки рабочих камер ванн стекловаренных печей.

6. ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Изоляционный материал должен обладать малым коэффициентом теплопроводности, постоянством состава и объема при высоких температурах, малым объемным весом и достаточной прочностью. Теплоизоляционный материал используется в виде обычной кладки, а также обмазки или обмотки.

Для изоляции печей применяют, главным образом, кизельгуровый кирпич, полученный обжигом при 700—800° смеси инфузорной земли и глины, часто с выгорающими добавками. Недостатком кизельгура является разрушение структуры при температуре выше 1000°, что ухудшает его изоляционные свойства. Теплоизоляционный трепельно-опилочный кирпич имеет объемный вес 350—450 кг/м³, временное сопротивление сжатию 5—10 кг/см², коэффициент теплопроводности 0,07—0,1 кал/м час град.

Под названием «огнеупорный легковес» выпускают шамотный и диасовый кирпич, изготовленные обжигом соответствующих материалов с поробразующими добавками. Обладая ценными термическими свойствами, близкими к свойствам шамота и диаса, этот материал имеет низкую теплопроводность и малый объемный вес.

Объемный вес теплоизоляционных огнеупорных материалов колеблется в пределах 300—1000 кг/м³, огнеупорность 1400—1700°, кажушаяся пористость 67—84%. Для кладки легковесных огнеупоров применяют специальные цементы, а для защиты от воздействия шлаков — обмазки или глазури, наносимые слоем толщиной 1—1,5 мм. Наименьшим объемным весом (50—800 кг/м³) отличаются материалы, получаемые вспениванием шликера с помощью пенообразующих добавок; при этом временное сопротивление сжатию доходит до 40 кг/см², коэффициент теплопроводности 0,08—0,18 кал/м час град.

В СССР разработана технология производства пеностекла и пеношамотных легковесных огнеупоров.

Для изоляции обмазкой применяют асбестит. Он состоит из смеси мелких волокон асбеста, огнеупорной глины и трепела и наносится на изолируемую поверхность слоем толщиной 75—150 мм.

7. ОБВЯЗКА

Для восприятия распора сводов и давления материала, предупреждения деформации кладки при изменении температуры, придания большей строительной прочности кладке на случай

возникновения усилий, связанных со взрывами, и для подвески отдельных элементов кладки некоторые части печей обвязывают.

Обвязка печи не должна препятствовать движению стен печи в направлении расширения. Она воспринимает побочные движения кладки: выпучивание, возникающее вследствие внутренних напряжений, и смещение кладки под действием внешних усилий.

В соответствии с этим различают несущую обвязку, воспринимающую распор или являющуюся опорой, и удерживающую обвязку, воспринимающую внутренние напряжения кладки.

Обвязка может представлять собой кожух, охватывающий часть кладки, или отдельные элементы, обычно из прокатных профилей. Применяют преимущественно последний вид обвязки.

Обычно обвязка состоит из стоек из прокатных профилей, стянутых связями сверху и снизу. Часто нижние части стоек закрепляют наглухо, а сверху предусматривают крепление, регулируемое с помощью связей из круглой и реже из полосовой стали.

Обвязка надземных кирпичных газопроводов состоит из стоек, устанавливаемых вдоль газопровода через каждые 2—3 м. Для восприятия распора свода по всей длине канала вдоль пят прокладывают профильное железо, обычно уголки или швеллеры.

Отдельные элементы печей обвязывают с помощью вертикально установленных уголков или балок.

Обвязка кладки рабочей камеры воспринимает распор свода и часто используется для подвески стен и свода рабочей камеры. При высоких температурах происходят раскрытие швов динасовых сводов и усадка шамотной кладки, что понижает прочность и плотность печи. Поэтому обвязка верхнего строения должна допускать возможность гибкой регулировки.

Обвязка рабочей камеры печей представляет собой обычно металлические колонны (стойки), на которых установлены связи, воспринимающие распор свода и обвязывающие дно, а иногда и крошечей для подвески стен и свода.

Нижние концы стоек часто заделывают в кладку или фундамент на глубину 150—500 мм.

Верхние связи дают возможность регулировать затяжку свода, что необходимо при пуске и остановке печей. Регулируют их обычно вручную.

Опорные конструкции рассчитывают в основном так же, как и обычные механические и строительные конструкции. Отличия заключаются в том, что учитывают дополнительные усилия, или сжатия материалов.

В участках с низкой температурой (фундаменты, регенераторы, опорные колонны под печью) принимают такие же напряжения, как для ответственных строительных сооружений. Запас прочности принимается равным 3—4.

Колонны рассчитывают на изгиб и сжатие и проверяют на продольный изгиб; консоли, несущие плиты и опоры рассчитывают на изгиб.

Температура обвязки обычно не превышает 50—150° и лишь при прогаре кладки достигает 200—300°. При этих температурах прочность стали не снижается.

Допускаемые напряжения на изгиб для стоек составляют 1200—1300 кг/см². Для связей допускаемое напряжение на разрыв в расчетном сечении (резьба под гайкой) составляет 800 кг/см².

Сильный нагрев связей увеличивает их термическое удлинение и сопровождается понижением прочности — уменьшением предела упругости. Связь, разогревая до 600—700°, растягивается, не скрепляя кладки. Более сильный нагрев вызывает расплавление связей и обflowsывание кладки, в которой они заложены.

Кладка расширяется значительно сильнее, чем связи. Так как часто поперечное сечение кладки во много раз больше сечения связей, то их удлинение может превзойти предел упругости или же они могут изогнуть стойки. Во избежание этого регулируют связи, отпуская их при чрезмерном натяжении.

Связи колонн, нагруженных сводом, рассчитывают на распор свода с учетом дополнительной нагрузки на колонны.

При повышении температуры кладка свода расширяется. Внутренняя сторона удлиняется, а внешняя сохраняет почти начальные размеры. В результате могут иметь место сдвиг пят, сжатие кирпичей или подъем свода. Если пятя не могут быть сдвинуты, кирпичи окажутся сжатыми, и свод начнет подниматься. Если кирпичи не сжимаются и пятя не раздвигаются, подъем свода значителен и вблизи пят кирпичи остаются в соприкосновении по всей поверхности, то вблизи замка с внешней стороны образуется зазор, т. е. раскрываются швы, и кирпичи соприкасаются только по внутренней кромке.

При высокой температуре происходит размягчение и сжатие кирпича, и нагрузка распределяется на некоторую поверхность.

Положение линии давления в своде меняется в зависимости от температуры, степени размягчения, пластичности и коэффициента расширения кирпича. В холодном своде линия давления проходит вблизи средней линии свода. При нагреве и подъеме свода линия давления вблизи замка свода перемещается к внутреннему обрезу кирпича.

Обычно своду предоставляется возможность подъема в некоторых пределах. Если подъем слишком велик и наблюдается значительное раскрытие швов, раздвигают пятя, отпуская связи. При охлаждении свода пятя снова должны быть сближены путем затяжки связей. Затяжка и отпуск связей вручную производятся на основе наблюдения за их натяжением.

При неправильном росте, сильном раскрытии швов, малой поверхности соприкосновения кирпичей, а также осадке пят устойчивость свода нарушается и возможен его обвал.

В целях упрощения расчета усилий, возникающих в своде, производится для холодного свода. Нагрев учитывают, принимая соответствующие коэффициенты запаса прочности. Для равномерно нагруженного свода, во избежание раскрытия швов, необходимо, чтобы линия давления во всех участках возможного раскрытия швов проходила на расстоянии от центра тяжести, не превышающем $\frac{1}{6}$ длины шва. В этом случае в крайних точках шва не будет растягивающих усилий.

Плоские своды применяют для перекрытия отверстий с малым пролетом, если подъем свода усложняет конструкцию. Кладку, находящуюся в земле, обычно не обвязывают.

8. ФУНДАМЕНТЫ

Печь непосредственно опирается на фундамент или нагрузку от нее передается фундаменту через промежуточные опоры. Фундаменты доводят до устойчивого грунта. При неустойчивых грунтах предусматривают специальные мероприятия для передачи нагрузки на достаточно надежный грунт. Основание печи должно находиться выше уровня грунтовых вод.

Фундаменты выполняют из бутового камня и бетона. Иногда— для передачи нагрузки на большую поверхность— применяют железобетон.

Размеры основания фундамента определяют нагрузкой и допустимым давлением на грунт. Допустимое давление на грунт составляет для мелкого песка с примесью ила $1,0 \text{ кг/см}^2$, мелкого, плотно слежавшегося песка $2,0$, песка крупного, плотно слежавшегося $4,5$, гравелистых грунтов $3,5$, гальки крупной, плотно слежавшейся $6,0 \text{ кг/см}^2$.

Толщина фундамента должна быть такова, чтобы давление от сооружения передавалось на все основание и в фундаменте не возникало слишком больших изгибающих и скальвающих усилий. Обычно толщина бетонного фундамента под стенами печей при хороших грунтах составляет не менее 500 мм и под стенами каналов—не менее 120 мм . При выборе глубины заложения фундамента учитывают возможность промерзания грунта при остав-

лении. Для уменьшения удельной нагрузки на грунт фундаменты уширяют книзу под некоторым углом. Величина этого угла составляет— 34° и для бетона на смешанном растворе 27° , на цемент-

Отдельные печные сооружения должны иметь самостоятельные и не связанные со зданием фундаменты.

Кладка печи должна быть такова, чтобы фундамент не нагревался излишне сильно. Для этой цели иногда предусматривают устройство воздушных каналов между фундаментом и кладкой печи.

Глава десятая

ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПЕЧЕЙ

Как указывалось в главе первой, электрические печи подразделяют на дуговые, сопротивления и индукционные. Печи сопротивления в свою очередь разделяют на печи косвенного и прямого нагрева.

1. ДУГОВЫЕ ПЕЧИ

В дуговых печах вольтова дуга образуется между специальными электродами или между электродами и нагреваемым материалом. Следовательно, ток проходит только через электроды или через электроды и материал. Электроды делают из тугоплавкого проводника. Изменяя напряжение и расстояние между электродами, меняют длину вольтовой дуги.

В дуговых печах используют токи большой силы и низких напряжений (не больше 200 в). Наиболее рационально применение трехфазного тока.

Материалом для электродов обычно служит графит или уголь. Допустимая нагрузка на графитовые электроды составляет $25\text{--}30 \text{ а/см}^2$ и на угольные $10\text{--}15 \text{ а/см}^2$.

Во избежание раскаливания электроды искусственно охлаждают. Расстояние между электродами обычно регулируют автоматически. На рис. 1-г представлена схема дуговой печи.

2. ПЕЧИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Печи косвенного нагрева

В печах косвенного нагрева необходимое тепло выделяется при прохождении электрического тока по сопротивлению-нагревателю. Количество тепла Q , выделившегося в единицу времени, определяется из выражения:

$$Q = 0,860 I^2 R = 860 W \text{ кал/час,}$$

(1)

где I —сила тока в амперах;

R —сопротивление в омах;

W —мощность в квт.

Количество тепла, выделяющегося в печи, равняется сумме количеств тепла, выделяемых в каждом однородном участке печи.

Тепло от нагревателя может передаваться материалу посредством тепловым соприкосновением, излучением или путем нагревания вспомогательной среды, например воздуха, переносимой тепло.

При определении размеров нагревателя пользуются данными о предельной плотности тока, допустимой для данного нагревателя.

Мощность нагревателя определяется из выражения:

$$W = \frac{Q}{860} \text{ квт.} \quad (2)$$

При выбранном или заданном напряжении в сети V сила тока определяется из выражения:

$$I = 1000 \frac{W}{V} \text{ а.} \quad (3)$$

Зная предельную плотность тока i а/см², сечение проводника определяют по формуле:

$$s = \frac{I}{i} \text{ см}^2. \quad (4)$$

Сопротивление всего нагревателя равняется:

$$R = \frac{V}{I} \text{ ом.} \quad (5)$$

Длину проводника при его удельном сопротивлении ρ определяют из выражения:

$$R = \rho \frac{l}{s} \text{ ом.} \quad (6)$$

Нагреватели выполняются из достаточно жароупорного материала, имеющего невысокое удельное сопротивление.

В качестве материала для нагревателей в лабораторных печах применяют никром, платину, угольную мелочь (криптол) и молибден.

Криптоловые печи просты по конструкции и дают возможность получать высокие температуры порядка 1800—2000°, но применение их ограничено существенными недостатками: в процессе работы выделяется СО и криптол выгорает. Это приводит к резкому изменению его сопротивления и местным перегревам.

Применение платины в качестве нагревателя ограничивается ее дороговизной. Платиновые печи делают только очень малой мощности.

Нагреватели из молибденовой проволоки применяют в печах, в которых температура достигает 2000°. Основной недостаток молибдена, как материала для электронагревателей,—его ломкость при нагреве в атмосфере воздуха. Вследствие этого молибденовые нагреватели работают только в искусственно созданной защитной атмосфере из паров спирта или водорода. Это

обстоятельство ограничивает область применения молибденовых печей.

Большее распространение получили печи сопротивления с никромовыми нагревателями. Такие печи применяются в силикатной промышленности для целей отжига и закалки стекла. Широкое распространение нашли силитовые нагреватели, состоящие в основном из карбида кремния. В печах, работающих с такими нагревателями, достигают температур порядка 1350—1420°, а при глобальных нагревателях (см. ниже) кратковременно даже 1600°. Силитовые нагреватели выполняют в виде стержней, средняя рабочая часть которых имеет сечение в несколько раз меньше, чем нерабочая наружная часть. Делают это для того, чтобы уменьшить выделение тепла в наружных контактных частях. Глобальные стержни, имеющие примерно такой же состав, выполняются несколько иначе. Каждый такой стержень состоит из трех отдельных частей одного сечения: одной рабочей (средней) и двух контактных наружных частей. Чтобы уменьшить тепловыделение в контактных частях, последние обрабатывают специальным образом, вследствие чего увеличивается их проводимость по сравнению с рабочей частью. Рабочую часть зажимают между контактными частями стержня и в рабочем виде такой стержень составляет одно целое.

Отрицательным качеством силитовых и глобальных стержней является «старение» их в процессе работы, т. е. увеличение их сопротивления. Вследствие этого при проектировании печей с такими нагревателями приходится предусматривать 30%-ный запас напряжения для компенсации возросшего сопротивления стержней.

Минимальное сопротивление стержня составляет 9 ом на 1 см длины и 1 мм² сечения, а максимальное: в интервале 1370—1480° — 12 ом и в интервале 1000—1370° — 20 ом.

Силитовые и глобальные печи применяют в керамической промышленности для обжига изделий до 1400°.

На рис. 1-е представлена схема печи косвенного нагрева. Ток проходит через графитовый стержень диаметром 25 мм, зажатый в графитовых электродах. Стержень нагревает массу из молотого кварца, образующего при плавлении кварцевое стекло.

Печи прямого нагрева

В печах прямого нагрева сопротивлением служит обрабатываемый предмет или материал, в котором и выделяется тепло. Этот материал включается в питающую электрическую цепь.

Печи прямого нагрева имеют ряд преимуществ в сравнении с печами косвенного нагрева: тепло выделяется равномерно во всем объеме изделия; нагрев можно вести очень быстро; потери весьма невелики.

К этому типу печей относятся стекловаренные электрические печи (рис. 105).

В печах прямого нагрева в большинстве случаев используют общепромышленный трехфазный переменный ток. Если только позволяет мощность сети, предпочтение следует отдать однофазной печи, так как она работает более равномерно.

Для расчета печей прямого нагрева используют те же формулы, что и для расчета печей косвенного нагрева; меняется лишь порядок расчета.

По расходу тепла, зависящему от количества обрабатываемого материала и конструкции печи, определяется потребная мощность. Форма и размеры сопротивления (материала), его удельная проводимость и предельная плотность тока определяют величину общего сопротивления печи и необходимую силу тока. Найденные величины дают возможность определить необходимые напряжения в рабочей цепи и рассчитать и выбрать электрическое оборудование и аппаратуру печи.

На рис. 2-ж представлена схема печи прямого нагрева.

3. ИНДУКЦИОННЫЕ ПЕЧИ

Значительное распространение в последние годы получили индукционные высокочастотные печи. Нагрев в этих печах происходит за счет индуктирования в токопроводящих материалах вихревых токов значительной величины и высокой частоты. Источниками токов повышенной и высокой частоты служат искровые, машинные и ламповые генераторы.

Искровые генераторы просты по конструкции, но имеют очень низкий к. п. д. — 30—40%, и в настоящее время применяются очень редко. Машинные генераторы, представляющие собой агрегат из асинхронного двигателя и собственно генератора, приносят для любых видов электротермии, исключая случаи, когда требуется получить изделие с очень тонким нагретым слоем. К. п. д. машинных генераторов достигает 75—80%. Наиболее универсальными и распространенными, но одновременно и наиболее сложными являются ламповые генераторы высокой частоты, из силового повышающего (до 10 кв) трансформатора, выпрямляющего лампового генератора, колебательного контура и индуктора, в ламповом генераторе, подаются в индуктор, внутри которого и производится нагрев токопроводящих предметов: металлов, славов, графита. Индуктор, во избежание расплавления, выполняется в виде спирали из медной полой трубки, охлаждаемой водой. Нагрев в таких печах производится чрезвычайно быстро. Материалы, плохо проводящие тепло, можно нагревать, помещая их в сосуды из проводящего материала.

На рис. 2-и представлена схема высокочастотной печи для плавки кварцевого стекла. Печь состоит из графитового тигля,

окруженного тепловой изоляцией, и расположенного снаружи индуктора из медной трубки, по которому пропускается ток высокой частоты (20 000—100 000 пер/сек.). Трубка одновременно является водяным холодильником.

Обычно для расчета печей высокой частоты исходными данными служат емкость печи, время расплавления, частота тока и напряжение. Расчетом определяют объем тигля, размеры индуктора, тепловые потери тигля, мощность печи и ее индуктивность, емкость конденсаторной батареи и мощность генератора высокой частоты.

Так как в процессе нагрева материала индуктивность печи меняется, необходимо предусмотреть возможность регулирования емкости конденсаторов.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ И РАСХОДА ТОПЛИВА

1. ВЫБОР ТИПА ПЕЧИ И ВИДА ТОПЛИВА

Тип печи выбирают на основе технико-экономических соображений, учитывая способ и объем производства, вид топлива, местные условия и т. д.

Вид применяемого топлива и способ его переработки определяют в первую очередь интересами народного хозяйства. В большинстве случаев они устанавливаются плановым заданием. Как правило, необходимо использовать местное топливо. Привозное топливо можно применять лишь в случае непригодности местного топлива по технологическим причинам.

При необходимости в переработке или подготовке топлива в больших установках, следует предусматривать его максимальное комплексное использование (часто с улавливанием побочных продуктов), даже если это значительно усложняет основное производство.

2. РАСЧЕТ ПЕЧИ

Определение размеров рабочей камеры

Размеры рабочей камеры следует определять на основе физической сущности явлений, протекающих в печи, исходя из условий протекания химических реакций и т. д. В ряде случаев выполнение подобного расчета представляет значительные трудности. Однако, следует стремиться производить расчет именно по такой схеме, так как в этом случае можно выявить истинное влияние действующих факторов, вскрыть причины низкой эффективности работы агрегатов, и наметить пути ее повышения.

При расчете шахтной обжигательной печи размеры отдельных зон определяют в зависимости от скорости нагрева или охлаждения материала, в соответствии со значениями коэффициента теплоотдачи от газов к кускам, а также, свойствами материала кусков, значениями водяных чисел газов и допустимыми ско-

ростями газов, определяемыми сопротивлениями движению или выносом материала.

Размеры отдельных зон туннельной печи для обжига огнеупорных материалов определяют в зависимости от допустимых скоростей нагрева и охлаждения. Следует принимать максимальные скорости, допустимые с точки зрения образования в материале напряжений, вызывающих появление трещин. Так же рассчитывают и сушилки.

Расчет ванной стекловаренной печи сводится к определению поверхностей ванны, требуемых для передачи необходимого тепла шихте и стекломассе, и охлаждения стекломассы, а также размеров пламенного пространства, необходимых для размещения горелочных устройств и передачи тепла. При этом следует учитывать конвекционные потоки стекломассы, что сильно усложняет расчет.

Аналогично определяются размеры и других печей.

Если методика расчета агрегата не разработана или недостаточно известны значения коэффициентов в теоретически обоснованных формулах, прибегают к использованию практических показателей, характеризующих в данных условиях скорость протекания процесса. Такими показателями являются удельная нагрузка (напряженность) площади сечения и объема рабочей камеры, линейная скорость протекания процесса и т. д.

Не следует переоценивать значения этих практических показателей. Они не отражают влияния основных теплотехнических и технологических факторов, имеют временное значение и подлежат постоянной проверке и уточнению.

Некоторые размеры рабочей камеры определяют чисто конструктивными соображениями, а именно: расположением и размером окон для обслуживания и газовых каналов, подъемом свода, необходимо избежать разрушения кладки, формой и длиной факела, условиями равномерности нагрева, охлаждения и распределения материалов.

Данные для расчета размеров печей приведены в соответствующих разделах. Ниже рассмотрена методика определения расхода топлива.

Определение расхода топлива

Для определения размеров топочных устройств, горелок, приспособлений для использования тепла отходящих газов, газопроводов, дымовых труб и энергетического оборудования, необходимо знать расход топлива и количество проходящих газов.

При проектировании испытанных конструкций определение расхода топлива иногда ведут по статистическим данным. Удельные расходы топлива или тепла относят к единице продукта, или к единице размера рабочей камеры: к 1 м^2 площади сечения или пода или к 1 м^3 объема.

Отнесение расхода тепла к единице продукта в печах с низким к. п. д. может повести к большим ошибкам. И в других случаях такая методика расчета дает лишь грубо ориентировочные величины.

Целесообразно определять расход тепла с помощью теплового баланса всей печи или рабочей камеры, что позволяет также охарактеризовать распределение тепла и определить к. п. д.

Определив расчетом расход топлива, устанавливают количество проходящих газов с помощью расчета горения.

Составление теплового баланса

При составлении теплового баланса отсчеты температур обычно ведут от 0°. Если отходящие газы удаляются из печи или сушилки при температуре выше точки росы, и влага не конденсируется, обычно не учитывают тепла конденсации влаги, так как в данном случае это не имеет физического смысла.

В печах непрерывного действия каждому участку соответствуют постоянные параметры, и легко задаться температурами сырых материалов, продукта, топлива, воздуха, отходящих газов и кладки и составом отходящих газов.

При составлении теплового баланса печей периодического действия следует руководствоваться изменениями температуры и состава отходящих газов во времени. Весь процесс делят на части, для которых отдельные параметры принимаются постоянными и составляют тепловой баланс отдельных периодов. При этом устанавливают изменения температуры в материалах и кладке и потери в окружающую среду. Отдельные балансы суммируют. Возможен более точный расчет при помощи графических или аналитических решений.

При составлении теплового баланса все расчеты относят к определенной единице: времени, количества продукта, топлива и т. д. В большинстве случаев балансы относят к единице времени. При составлении материального и теплового балансов следует четко представлять себе выбранные границы и отнести к ним все ваты граница баланса. Параметры веществ должны точно соответствовать границам балансов. В зависимости от принятых границ, статьи балансов могут значительно меняться.

При составлении теплового баланса шахтной печи в качестве границ можно принять границы определенной зоны, например, обжигача или внешние границы печи.

В первом случае в приходе будет теплота нагрева материала, подсушенного и подогретого отходящими газами, и теплота нагрева воздуха, подогретого отходящими газами, и теплота нагрева отходящих газов и продукта, а в расходе — теплота рауту. Температуры воздуха и материала определяют условиями теплообмена в зонах подогрева и охлаждения. Если в качестве границ теплового баланса принять внешние границы в печи,

то в приходе будет теплота нагрева свежезагруженного материала и поступающего в печь воздуха, а в расходе — теплота нагрева продукта и отходящих газов, имеющих сравнительно низкую температуру.

Таким образом, при отнесении баланса к внешним границам печи нельзя учитывать, например, подогрев воздуха в зоне охлаждения. В обоих случаях учитываются тепловые эффекты протекающих процессов, причем в первом случае только в зоне обжигача и во втором — во всей печи.

В регенеративной ванной стекловаренной печи в качестве границ теплового баланса для топлива, воздуха и отходящих газов можно принять переводные клапаны, горелки или влеты в печь. Баланс шихты и стекломассы можно отнести к варочной части ванны или внешним границам печи.

В общем случае приходными статьями теплового баланса являются:

- 1) потенциальное тепло (теплотворная способность) топлива;
- 2) теплота нагрева топлива;
- 3) теплота нагрева воздуха (и водяного пара или каких-либо газов, если они вводятся);
- 4) теплота нагрева обрабатываемого материала.

Расходными статьями теплового баланса являются:

- а) затрата тепла на процессы, протекающие в обрабатываемом материале;
- б) теплота нагрева продукта при температуре, соответствующей границе баланса;
- в) потери с отходящими газами;
- г) теплота нагрева продуктов разложения обрабатываемого материала;
- д) передача тепла из рассматриваемой части печи в другие;
- е) потери в окружающую среду (инюгда и потеря с охлаждающей водой);
- ж) потери вследствие провала и уноса.

Рассмотрим отдельные приходные статьи.

1. Потенциальное тепло топлива. Теплотворную способность топлива можно определить расчетом по составу топлива, с помощью калориметра или принять по литературным данным.

Если за принятую единицу времени, например час, сгорит x единиц топлива и теплотворная способность единицы топлива Q кал, то величина этой статьи составит:

$$q_{пр, 1} = Qx \text{ кал/час.} \quad (1)$$

2. Теплота нагрева топлива. Если топливо подогрето до t_m^0 и теплоемкость его c_m , то величина этой статьи составит:

$$q_{пр, 2} = xc_m t_m^0 \text{ кал/час.} \quad (2)$$

Жидкое топливо (мазут) обычно подогревают до невысокой температуры, и удельная теплоемкость его составляет примерно

0,5 кал/кг град. Твердое топливо обычно не подогревают; теплоемкость древесины составляет 0,6, торфа — 0,3, угля — 0,3 и кокса — 0,2 кал/кг град.

Газообразное низкокалорийное топливо, как правило, подогревают до высокой температуры¹. Высококалорийное газообразное топливо обычно не подогревают, так как вследствие небольшого объема оно внесет мало тепла, и, кроме того, может разложиться при прогреве.

3. Теплота нагрева воздуха. Если по расчету горения на единицу топлива расходуется a м³ воздуха, температура воздуха t_a^0 и теплоемкость воздуха c_a кал/м³ град, то количество вносимого тепла составит²:

$$Q_{пр, 3} = a x c_a t_a^0 \text{ кал/час.} \quad (3)$$

4. Теплота нагрева обрабатываемого материала. При теплоемкости материала³ c_m кал/кг град, температуре его t_m^0 и загружаемом в час количестве G_m кг, теплота нагрева составит:

$$Q_{пр, 4} = G_m c_m t_m^0 \text{ кал/час.} \quad (4)$$

Рассмотрим отдельные расходные статьи.

а) Затрата тепла на процессы, протекающие в обрабатываемом материале. Эти процессы могут быть экзотермические и эндотермические; обычно преобладают последние. Если в конечном итоге, в результате превращений в материале, тепло выделяется, то его можно перенести с положительным знаком в приходную часть баланса.

Для определения теплот реакций можно пользоваться правилом академика Гесса: тепловой эффект реакции равняется теплоте образования конечных продуктов из элементов минус тепловой эффект образования начальных продуктов из элементов.

Если количество тепла, затрачиваемого на физико-химические превращения в материале, составляет $Q_{реакции}$ кал/кг продукта, количество продукта, получаемое в час, $G_{пр}$ кг, то расход тепла по рассматриваемой статье составит:

$$Q_{расх, 1} = G_{пр} Q_{реакции} \text{ кал/час.} \quad (5)$$

б) Теплота нагрева продукта. Теплота нагрева продукта должна быть взята при температуре $t_{пр}$ границы, к которой отнесен баланс. Если теплоемкость продукта $c_{пр}$ кал/кг град, то количество тепла по этой статье составит:

$$Q_{расх, 2} = G_{пр} c_{пр} t_{пр} \text{ кал/час.} \quad (6)$$

В печах периодического действия теплота нагрева материала с/кривой распределения температур во времени.

¹ Данные о теплоемкостях см. опись литературы (5).
² Аналогично определяют теплоту нагрева вводимых газов или водяного пара.

³ Аналогично определяют теплоту нагрева транспортных устройств, служащих для перемещения материалов или изделий.

в) Потери с отходящими газами. Эта статья складывается из двух: теплоты нагрева отходящих газов и их потенциального тепла (химической неполноты горения).

Если выход отходящих газов на единицу топлива δ м³, температура дымовых газов t_d^0 и теплоемкость c_d кал/м³ град, теплота нагрева дымовых газов составит:

$$Q_{расх, 3} = \delta x c_d t_d^0 \text{ кал/час.} \quad (7)$$

Если в дымовых газах содержатся окись углерода и водород в количестве CO% и H₂%, то потеря от химической неполноты горения составит:

$$Q_{расх, 4} = (30,18CO\% + 25,79H_2\%) \delta x \text{ кал/час.} \quad (8)$$

г) Теплота нагрева продуктов разложения обрабатываемого материала. Если теплота нагрева продуктов разложения обрабатываемого материала или испарения влаги не учтена в пп. «а» и «в», то она учитывается отдельно.

При количестве сухих продуктов разложения V_p м³/час, средней теплоемкости их c_p кал/м³ град и количестве испаряемой влаги W_p кг/час, теплосодержание продуктов разложения составит:

$$Q_{расх, 5} = V_p c_p t_d^0 + (595 + 0,48t_d) W_p \text{ кал/час.} \quad (9)$$

д) Передача тепла из одной части печи в другую. Количество тепла, которое должно быть передано из одной части печи в другую, устанавливается по тепловому балансу ее частей.

Если известны размеры печи, можно установить количество передаваемого тепла. Учитывается тепло, передаваемое излучением, переносимое потоками газов через свободное пространство и передаваемое теплопроводностью через стенку.

е) Потери в окружающую среду. Эта статья складывается из следующих:

- 1) потери с выбивающимися газами,
 - 2) потери излучением через отверстия,
 - 3) потери через ограждения.
- 4) Потери с выбивающимися газами. Количество газов, выбивающихся через щели заслонок, и количество присасываемого воздуха можно определить следующими расчетом.

Если давление в печи определяется только геометрическим напором и известны следующие размеры (рис. 62):

$f_1 = f_1' + f_1''$ — площадь щелей с боков заслонки, ограниченная верхним краем окна и нейтральной линией в м²;

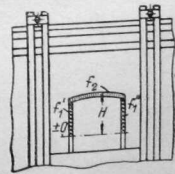


Рис. 62. Схема к расчету количества выбивающихся газов.

f_2 — площадь щели между заслонкой и верхним краем окна в м²;

H — высота от нейтральной линии до верхнего края окна в м, то количество газов $V_{в,г}$, м³/сек. с удельным весом $\gamma_{в,г}$ кг/м³, выбивающихся через верхнюю горизонтальную щель, составляет:

$$V_{в,г} = \varphi f_2 \sqrt{\frac{2gH(\gamma_{в,г} - \gamma_{в,г})}{\gamma_{в,г}}} \text{ м}^3/\text{сек.}, \quad (10)$$

где: $\gamma_{в,г}$ — объемный вес воздуха в кг/м³;

φ — коэффициент расхода (примерно 0,75).

Количество газов, выделяющихся через вертикальные щели заслонки, в 1,5 раза меньше, чем выделяющихся из горизонтальной щели той же площади вверху заслонки, т. е. на уровне верхнего края вертикальной щели. Если количество выбивающихся газов $V'_{в,г}$ м³/час, теплоемкость их $c_{в,г}$ кал/м³ град и температура $t_{в,г}$, то потеря тепла с выбивающимися газами составит:

$$q_{расх, в, г} = 3600V'_{в,г} \frac{273}{273 + t_{в,г}} c_{в,г} t_{в,г} \text{ кал/час.} \quad (11)$$

Если щели расположены ниже нулевой линии, будет засасываться воздух, вносящий тепло. Для определения количества присасываемого воздуха используют те же формулы.

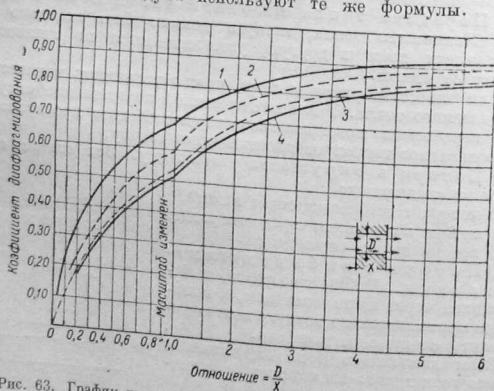


Рис. 63. График для определения коэффициента диафрагмирования отверстия:

1 — прямоугольное (2:1); 2 — прямоугольное вытянутое; 3 — квадратное; 4 — круглое (цилиндр).

2) Потеря излучением через отверстия. Количество тепла, теряемое излучением через отверстия, определяется по формуле:

$$q_{расх, в, от} = 4,96\varphi \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{вн}}{100} \right)^4 \right] F_{от} \text{ кал/час,} \quad (12)$$

где: φ — коэффициент диафрагмирования, зависящий от размеров отверстия и толщины кладки (рис. 63);

T_n — температура в печи в °K;

$T_{вн}$ — наружная температура в °K;

$F_{от}$ — площадь отверстия в м².

На рис. 63 даны значения φ в зависимости от формы отверстия и отношения $\frac{D}{x}$, где D — ширина отверстия в м, x — толщина стенки в м.

3) Потеря через ограждения. В печах непрерывного действия подсчет потерь тепла в окружающую среду через ограждения $q_{расх, в, оз}$ кал/час сравнительно прост. Для расчета может быть использована формула:

$$q_{расх, в, оз} = \frac{1}{\sum \frac{\delta}{\lambda}} (t_{вн} - t_{вн}) F_{оз} \text{ кал/час,} \quad (13)$$

где: $\sum \frac{\delta}{\lambda} = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n}$ — термическое сопротивление кладки,

состоящей или из одного слоя толщиной δ м с коэффициентом теплопроводности λ кал/м час град или из нескольких слоев толщиной $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n$ с коэффициентами теплопроводности соответственно $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ кал/м час град;

$t_{вн}$ — температура внутренней поверхности ограждений в град;

$t_{вн}$ — температура наружной поверхности ограждений в град;

$F_{оз}$ — поверхность ограждений в м².

Температуры поверхностей ограждения можно подсчитать по температурам печи и окружающего пространства. Проще, определив температуру внутренней поверхности ограждений, найти температуру внешней поверхности и потерю в окружающую среду по графикам (рис. 64). Величина $F_{оз}$ берется в соответствии с формой ограждений.

В печах периодического действия для составления баланса каждого периода, помимо расхода тепла по другим статьям, подсчитывают количество тепла, аккумулированного и потерянного в окружающую среду, пользуясь точными или приближенными методами. Часто принимаются упрощающие предположения, допускающие использование закономерностей стационарного теплового потока.

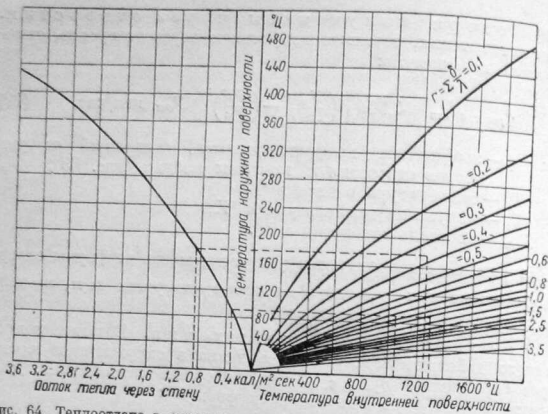


Рис. 64. Теплоотдача в окружающую среду в зависимости от температуры стенки:
 δ — толщина стенки в м; λ — коэффициент теплопроводности в кал/м час град.

ж) Потеря вследствие провала и уноса («механическая неполнота горения»). Если в твердых остатках от горения топлива содержатся горючие составные части — преимущественно углерод, и содержание его в остатках равняется $C\%$ веса топлива, то потеря составит:

$$q_{расх, \gamma} = 80Cx \text{ кал/час.} \quad (14)$$

Определение сопротивлений на пути газов

При заданных размерах печи определяют сопротивления: 1) местные h_m мм вод. ст., 2) от трения $h_{тр}$ мм вод. ст. и 3) связанные с валищем геометрического напора h_z мм вод. ст.

Величина требуемой для работы печи тяги или давления воздуха (или газа) без учета запаса равняется:

$$h = h_m + h_{тр} \pm h_z = h_{потерь} \pm h_g. \quad (15)$$

Если геометрический напор содействует движению газов, величина его берется со знаком минус, а если противодействует, то со знаком плюс.

Сопротивления по пути движения в печь горячего газа и воздуха должны преодолеваются геометрическим напором печи или искусственно и должен оставаться известный запас (30—40%) на

случай форсировки, засорений и ухудшения качества топлива. При недостаточности геометрического напора и отсутствии запаса необходимо изменить размеры каналов для уменьшения сопротивления или применить искусственное дутье.

Сопротивления на пути дымовых газов должны преодолеваются тягой дымовой трубы или искусственно и должен оставаться известный запас, зависящий от условий работы — вероятности засорений, форсировки и т. д.

Методы расчета потерь давления изложены в главе II.

ПРОЦЕСС СУШКИ И СУШИЛКИ

1. ЗНАЧЕНИЕ СУШКИ ИЗДЕЛИЙ И МАТЕРИАЛОВ В СИЛИКАТНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Сушкой называется процесс освобождения твердых материалов от содержащейся в них влаги за счет ее испарения, т. е. перехода влаги тела из жидкого состояния в газообразное и удаления образовавшихся паров с поверхности тела в окружающую среду.

Осуществление этого процесса возможно только при подводе тепла к влажному телу и при условии, что давление (или концентрация) водяных паров у поверхности тела больше давления (или концентрации) водяных паров в окружающей среде.

Тепло подводится к телу конвекцией от теплого воздуха и дымовых газов, лучеиспусканием от нагретых поверхностей, за счет создания в теле электрического поля высокой частоты и другими способами.

В силикатной промышленности сушат исходные материалы, как, например, песок, комовую глину, топливо и керамические изделия. Сушат материалы для того, чтобы подготовить их к дальнейшим технологическим процессам: размельчению, просеиванию, смешению и т. д. Керамические изделия сушат для того, чтобы придать им механическую прочность, необходимую для укладки на вагонетки и в штабели при последующем обжиге.

Сушить песок можно при любых температурах и скоростях удаления влаги, без нарушения его качества.

Сушить комовую глину и топливо можно при любых скоростях удаления влаги, но температура поверхности этих материалов ограничивается. Так, глина при температуре выше 400° теряет пластичность, а в топливе выше 150—200° начинается возгонка горючих продуктов. Растрескивание глины при сушке, вследствие усадки и возникающих усадочных напряжений, не ухудшает ее качества, а, наоборот, способствует ускорению процесса удаления влаги.

Сушка керамических изделий требует определенного режима как в отношении допускаемых безопасных скоростей сушки, так и температуры поверхности изделий. Это обусловливается свойством глины давать усадку при сушке, в результате чего возникают усадочные напряжения, которые могут вызвать деформацию изделия и даже появление трещин. Вели-

чина усадки, а следовательно, и напряжений зависит от разности концентраций влаги в теле изделия, которая тем больше, чем больше скорость сушки и чувствительность данного сорта глины к сушке.

В изделиях различной толщины, изготовленных из одного сорта глины при одинаковой скорости сушки, возникают различные по величине напряжения. Чем сложнее конфигурация изделий, тем больше величина этих напряжений.

Следовательно, допускаемая максимальная безопасная скорость сушки должна определяться в зависимости от толщины изделия, степени чувствительности данного сорта глины к сушке и конфигурации изделия.

На необходимость разработки теории сушки с учетом усадочных напряжений впервые указал академик Н. Н. Доброхотов, который в 1945 г. разработал метод расчета режима сушки с учетом усадочных напряжений.

Сущность процессов, происходящих при сушке, и законы, управляющие этими процессами, характеризуются рассмотренными ниже:

- а) статикой сушильных процессов, определяющей материальный и тепловой баланс сушки;
 - б) динамикой процесса сушки, определяющей зависимость скорости сушки от свойств материала, размеров высушиваемого тела, а также условий теплопередачи и движения материалов и высушивающего агента;
 - в) изменением свойств материала и изделия по мере удаления из него влаги и образованием усадочных напряжений, возникающих в процессе сушки керамических изделий, имеющих непосредственную связь с указанными выше процессами.
- Сушка материалов может происходить естественным и искусственным путями.

Естественная сушка обычно производится на открытом воздухе под навесом или в специальных сараях и представляет собой процесс, при котором сушильный агент (воздух), поглотивший пары воды, отводится без применения вентиляторов.

Искусственная сушка материалов производится в специальных устройствах—сушилках, в которых сушильный агент, поглотивший пары воды, отводится при помощи вентилятора или иного вытяжного устройства. Тепло передается материалу этим же агентом сушки, нагретым в калорифере или полученным при сжигании топлива в топке, или излучением от поверхностей нагрева.

В настоящее время до 70—80% всех изделий и материалов высушивают в искусственных сушилках. Применение вентиляторов повышает производительность и улучшает работу сушильных устройств; поэтому надо применять, как правило, принудительную вентиляцию сушилок. Естественная сушка допустима лишь в устройствах очень малой производительности.

2. ПАРАМЕТРЫ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

Сушка всех материалов в силикатной промышленности производится горячим воздухом или дымовыми газами. Наиболее распространена сушка горячим воздухом.

Ввиду отсутствия заметной разницы между газами и чистым воздухом с точки зрения их сушильных свойств, рассмотрим эти свойства применительно к атмосферному воздуху, который можно рассматривать как смесь сухого воздуха и водяных паров.

Под сушильным агентом понимают газообразную среду (воздух или дымовые газы), которые в условиях непосредственного соприкосновения и теплообмена с высушиваемым материалом воспринимает удаляемую из него влагу.

Согласно закону Дальтона, каждый из газов, входящих в смесь, занимает объем, равный объему, занимаемому всей смесью. При этом, давление смеси равно сумме парциальных давлений отдельных газов:

$$P_{см} = p_g + p_n \quad (1)$$

Весовое количество водяных паров, заключенное в 1 м³ влажного воздуха, называют абсолютной влажностью воздуха. Следовательно, абсолютная влажность воздуха равна весу 1 м³ водяного пара γ_n при данной температуре и данном парциальном давлении.

Обозначая парциальное давление водяного пара через p_n , имеем:

$$\frac{p_n}{\gamma_n} = \frac{R \cdot T}{M_n} \quad (2)$$

или

$$\gamma_n = \frac{M_n \cdot p_n}{R \cdot T} \quad (3)$$

где: γ_n — абсолютная влажность воздуха или удельный вес водяных паров в кг/м³;

p_n — парциальное давление водяных паров в кг/м²;

R — газовая постоянная, равная 848 кгм/моль °К;

M_n — молекулярный вес водяного пара, равный 18;

T — абсолютная температура влажного воздуха в °К.

При определенной температуре абсолютная влажность имеет предельное максимальное значение при максимальной упругости водяных паров, т. е. при насыщении воздуха водяными парами, когда

$$p_n = p_n^* \text{ и } \gamma_n = \gamma_n^*$$

где: p_n^* — парциальное давление насыщенных водяных паров в кг/м²;

γ_n^* — удельный вес водяных паров, насыщающих воздух, в кг/м³.

Значение абсолютной влажности воздуха (γ_n) и упругости насыщенного водяного пара (p_n^*) при данной температуре указаны в табл. 13 и 14.

Степень насыщения воздуха водяными парами характеризуется его относительной влажностью φ .

Относительной влажностью воздуха принято называть отношение упругости водяного пара (p_n) во влажном воздухе к упругости водяного пара при полном его насыщении при той же температуре (p_n^*), следовательно:

$$\varphi = \frac{p_n}{p_n^*} \text{ или } \varphi = \frac{p_n}{p_n^*} \cdot 100\% \quad (4)$$

При малых давлениях можно считать водяной пар идеальным газом и выразить p_n и p_n^* через удельный вес и абсолютную температуру:

$$p_n = \gamma_n \cdot R_n \cdot T \text{ и } p_n^* = \gamma_n^* \cdot R_n \cdot T.$$

Разделив первое из уравнений на второе, получим:

$$\frac{p_n}{p_n^*} = \frac{\gamma_n}{\gamma_n^*} = \varphi \quad (5)$$

φ изменяется от 0 до 1 или от 0% до 100%.

В уравнениях (4) и (5) справедливы в пределах температур, при которых $p_n \leq B$, где B — барометрическое давление.

Относительная влажность воздуха является важной характеристикой влажного воздуха в процессе сушки.

Влагосодержанием воздуха называется вес водяного пара, содержащегося во влажном воздухе, приходящийся на 1 кг сухого воздуха. Влагосодержание принято измерять в г на 1 кг сухого воздуха и обозначать через d г/кг с. в.

Численное значение влагосодержания можно вычислить, пользуясь уравнением Клапейрона для воздуха и водяных паров:

$$p_g \cdot v = \frac{R \cdot T}{M_g} \text{ и } p_n \cdot v = \frac{R \cdot T}{M_n}$$

где: R — газовая постоянная, равная 848 кгм/моль °К;

M_n — молекулярный вес пара, равный 18;

M_g — молекулярный вес воздуха, равный 29.

Во влажном воздухе водяной пар и воздух имеют одинаковую температуру и занимают один и тот же общий объем, поэтому отношение веса пара к весу чистого воздуха во влажном воздухе равно:

$$d' = \frac{p_n \cdot 18}{p_g \cdot 29} = 0,622 \frac{p_n}{p_g} \text{ кг/кг сухого воздуха} \quad (6)$$

или

$$d = 622 \cdot \frac{p_n}{p_g} \text{ г/кг сухого воздуха.}$$

Заменяя парциальное давление воздуха p_g величиной $B - p_n$, где $p_n = \varphi \cdot p_n^*$ и B — давление влажного воздуха (которое можно

назвать барометрическим давлением), получаем для влажного воздуха, находящегося при барометрическом давлении:

$$d = 622 \frac{P_n}{B - P_n} = 622 \frac{\varphi \cdot P_n}{B - \varphi \cdot P_n} \text{ г/кг сухого воздуха.} \quad (7)$$

Следовательно, при данном барометрическом давлении влажное содержание воздуха зависит только от парциального давления водяного пара, а так как давление насыщенного пара растет с температурой, то максимальное количество влаги, которое может содержаться в воздухе, зависит от его температуры, и тем больше, чем выше температура.

Удельный вес (вес 1 м³) влажного воздуха складывается из веса сухого воздуха и водяного пара, содержащихся в 1 м³ смеси:

$$\gamma = \gamma_o + \gamma_n \text{ кг/м}^3. \quad (8)$$

Подставляя значения γ_o и γ_n из уравнения Клапейрона, получаем:

$$\gamma = \frac{B \cdot 29}{848 \cdot T} - \frac{29 - 18}{848} \cdot \frac{\varphi \cdot P_n}{T} \text{ кг/м}^3. \quad (9)$$

Из формулы (9) следует, что удельный вес влажного воздуха всегда меньше удельного веса сухого воздуха.

Теплосодержание влажного воздуха складывается из теплосодержаний, содержащихся в смеси сухого воздуха и водяного пара.

Условимся относить теплоту нагрева (I) влажного воздуха к количеству его, содержащему в 1 кг сухого воздуха, иначе говоря к $(1 + \frac{d}{1000})$ кг влажного воздуха.

Теплосодержание 1 кг сухого воздуха составляет:

$$i_o = c_o \cdot t \text{ кал/кг,}$$

где: c_o — средняя теплоемкость сухого воздуха при постоянном давлении кал/кг град.

t — температура воздуха в град.

Теплоемкость сухого воздуха в пределах температур сушильных установок может быть принята равной

$$c_o \approx 0,24 \text{ кал/кг град}$$

и теплосодержание 1 кг сухого воздуха составляет

$$i_o = 0,24 \cdot t \text{ кал/кг.} \quad (10)$$

Теплосодержание 1 кг пара по приближенной формуле Л. К. Рамзина составляет:

$$i_n = 595 + 0,47 t \text{ кал/кг,} \quad (11)$$

где: 595 кал/кг — теплота испарения при 0°;
0,47 кал/кг град. — средняя теплоемкость водяного пара (в пределах сушильных температур);
 t — температура в град.

Таблица 13

Удельный вес водяного пара во влажном воздухе при относительной влажности воздуха 100%

t°	γ_n г/м ³	t°	γ_n г/м ³
-15	1,39	45	65,42
-10	2,14	50	82,94
-5	3,24	55	104,28
0	4,84	60	130,09
5	6,80	65	161,05
10	9,40	70	197,95
15	12,82	75	241,65
20	17,29	80	292,99
25	23,03	85	353,23
30	30,36	90	428,07
35	39,59	95	504,11
40	51,13	99,4	586,25

Таблица 14

Парциальное давление водяного пара во влажном воздухе при относительной влажности воздуха 100%

t°	P_n кг/м ²	t°	P_n кг/м ²	t°	P_n кг/м ²
-60	0,09	10	125,20	60	2031
-50	0,39	15	173,86	65	2550
-40	1,27	20	288,40	70	3177
-30	3,81	25	322,98	75	3931
-20	10,50	30	432,67	80	4828
-15	16,85	35	573,40	85	5895
-10	26,50	40	759,18	90	7148
-5	40,91	45	977,30	95	8620
0	62,26	50	1267,70	99,4	10128
5	88,96	55	1604,80	100	10333

Следовательно, теплосодержание влажного воздуха, относенное к 1 кг сухого воздуха, содержащегося в нем, будет составлять:

$$I = I_o + \frac{d}{1000} \cdot i_n = 0,24 t + 0,001 d (595 + 0,47 t) \text{ кал/кг сухого воздуха.} \quad (12)$$

3. СТАТИКА СУШИЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

Статика сушильных процессов определяется материальным и тепловым балансами сушилки.

Каждая сушилка состоит из следующих основных рабочих частей: а) сушильной (или рабочей) камеры, в которой протекает процесс сушки материала, б) калорифера, в котором происходит нагрев возду-

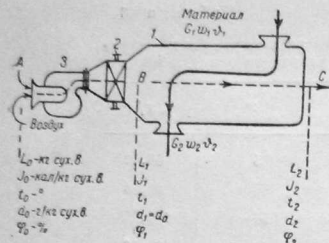


Рис. 65. Принципиальная схема сушилки:
1—сушилка; 2—калорифер; 3—вентилятор.

ха (агента сушки) с помощью какого-либо теплоносителя, в) вентилятора или дымососа для подачи сушильного агента. В качестве теплоносителя может служить пар, дымовые газы или электроэнергия. При сушке непосредственно дымовыми газами, последние одновременно являются агентом сушки и теплоносителем.

Вспомогательным оборудованием являются транспортные устройства для подачи материала, устройства для улавливания пыли, контрольно-измерительная и регулирующая аппаратура.

При сушке изменяются вес материала G , его влажность w и температура v (рис. 65).

Материальный баланс

Рассмотрим материальный баланс продукта, подвергающегося сушке.

Введем следующие обозначения и индексы:

G_1 — количество влажного материала, поступающего в сушилку, в кг/час;

G_2 — количество высушенного материала, выходящего из сушилки, в кг/час;

G_0 — вес абсолютно сухого материала, подвергающегося сушке, в кг/час;

w_1 и w_2 — соответственно начальная и конечная относительная влажность материала, т. е. количество влаги в процентах, отнесенное к весу влажного и высушенного материала;

w_1 и w_2 — соответственно начальная и конечная абсолютная влажность материала, т. е. количество влаги в процентах, отнесенное к весу абсолютно сухого материала G_0 , который во время сушки остается неизменным;

W — количество испаряемой влаги в кг/час.

Относительная влажность в % равна отношению веса влаги к весу влажного материала:

$$w' = \frac{W}{G_1} 100\%,$$

а абсолютная влажность в % — отношению веса влаги к весу абсолютно сухого материала:

$$w = \frac{W}{G_0} 100\%.$$

Формула перехода от относительной влажности w' к абсолютной влажности w :

$$w = \frac{100 \cdot w'}{100 - w'} \% \quad (13)$$

В сушильной технике чаще всего оперируют с абсолютной влажностью w .

Количество влаги, поступающей в сушилку с влажным материалом и выходящей из сушилки с высушенным материалом, соответственно равны:

$$W_1 = \frac{G_1 \cdot w_1'}{100} \text{ кг/час}; \quad W_1 = \frac{G_1 \cdot w_1}{100} \text{ кг/час};$$

и

$$W_2 = \frac{G_2 \cdot w_2'}{100} \text{ кг/час}; \quad W_2 = \frac{G_2 \cdot w_2}{100} \text{ кг/час}.$$

Количество испаренной в сушилке влаги:

$$W = G_1 - G_2 = W_1 - W_2 = \frac{G_1 \cdot w_1' - G_2 \cdot w_2'}{100} = \frac{G_0 \cdot (w_1 - w_2)}{100} \text{ кг/час}. \quad (14)$$

Рассмотрим баланс влаги и расход воздуха.

Принимаем, что вес абсолютно-сухого материала, а также вес сухого воздуха остаются постоянными при входе и выходе из сушилки.

Для удобства все расчеты, связанные с расходом воздуха и тепла, относим к 1 кг сухого воздуха, содержащегося во влажном, так как его количество остается неизменным.

Принимаем следующие индексы:

для параметров воздуха перед входом в калорифер — «0», для параметров воздуха и материала перед входом в сушилку — «1» и для параметров воздуха и материала при выходе из сушилки — «2»

В этом случае $L_0 = L_1 = L_2 = L$ кг/час сухого воздуха.

При установившемся процессе сушки, количество влаги, поступающей в сушилку с материалом и воздухом, должно быть равно количеству влаги, остающейся в материале после сушки и влаги, ушедшей с воздухом из сушилки.

Тогда материальный баланс по влаге напишется так:

$$L_1 \cdot \frac{d_1}{1000} + G_0 \cdot w_1 = L_2 \cdot \frac{d_2}{1000} + G_0 \cdot w_2 \quad (15)$$

Так как $L_1 = L_2 = L_0 = L$, $d_0 = d_1$ и влагосодержание воздуха, проходящего через калорифер, не меняется, то

$$L \cdot \frac{d_0}{1000} + G_0 \cdot w_1 = L \cdot \frac{d_2}{1000} + G_0 \cdot w_2 \quad (16)$$

После преобразования получаем:

$$L \frac{(d_2 - d_0)}{1000} = G_0 \frac{(w_1 - w_2)}{100} \quad (16)$$

Из уравнения (14) имеем $W = G_0 \frac{(w_1 - w_2)}{100}$ кг/час; тогда

$$W = L \frac{(d_2 - d_0)}{1000} \text{ кг/час.} \quad (17)$$

Обозначая через $l = \frac{L}{W}$, получаем расход сухого воздуха в кг на 1 кг испаряемой влаги:

$$l = \frac{1000}{d_2 - d_0} \text{ кг сухого воздуха} / \text{кг испаряемой влаги} \quad (18)$$

Расход воздуха уменьшается при увеличении d_2 и увеличивается при том же значении d_2 с увеличением d_0 .

При выборе производительности вентилятора, следует вести расчет на работу при максимальном значении d_0 , которое бывает в летнее время.

Баланс тепла

Рассмотрим баланс тепла теоретической сушилки. Теоретической сушилкой называют условно такую, в которой отсутствуют потери тепла в окружающую среду и на нагрев транспортных устройств и высушенного материала, считая температуры их при входе и выходе из сушилки одинаковыми.

При подсчете всех теплосодержаний от 0° тепловой баланс теоретической сушилки можно выразить следующим уравнением:

$$L_0 \cdot I_0 + Q_{ж} = L_1 \cdot I_1 = L_2 \cdot I_2 \quad (19)$$

где: I_0, I_1, I_2 — теплосодержание соответственно влажного воздуха, поступающего в калорифер, после калорифера при входе в сушилку и на выходе из сушилки в кал/кг сухого воздуха (см. формулу 15);

$Q_{ж}$ — количество тепла, сообщаемое воздуху в калорифере, в кал/час;

L_0, L_1, L_2 — расходы влажного воздуха в кг/час, выраженные в кг сухого воздуха, находящегося в нем.

При $L_0 = L_1 = L_2 = L = \text{const}$ (см. выше) имеем равенство:

$$I_1 = I_2 = \text{const,}$$

показывающее, что в теоретической сушилке процесс сушки идет при постоянном теплосодержании влажного воздуха.

Далее, из уравнения (19) получаем:

$$Q_{ж} = L(I_1 - I_0) = L(I_2 - I_0) \text{ кал/час.} \quad (20)$$

Разделив $Q_{ж}$ и L на W — количество испаряемой влаги в час и обозначая $\frac{L}{W} = l$ и $\frac{Q_{ж}}{W} = q$, получим расход тепла в калорифере на 1 кг испаряемой влаги:

$$q = l(I_1 - I_0) = l(I_2 - I_0) \text{ кал/кг влаги.} \quad (21)$$

После раскрытия и преобразования уравнения (21) получаем:

$$q = l[c_0(t_2 - t_0) + x_0(i_2 - i_0)] + i_2 \text{ кал/кг испаренной влаги} \quad (22)$$

где: c_0 — теплоемкость сухого воздуха в кал/кг град.;
 $x_0 = 0,001 d_0$ — влагосодержание воздуха, поступающего в калорифер, в кг/кг сухого воздуха.

Из уравнения (22) видно, что в теоретической сушилке расход подведенного в калорифере тепла складывается из трех членов:

- 1) i_2 — расхода тепла на испарение влаги из материала, равного теоретической теплоте парообразования, так как температура влаги в материале принята в расчете равной 0°;
- 2) $l \cdot c_0(t_2 - t_0)$ — потери тепла с сухим сушильным агентом, входящим в сушилку с температурой t_0 , а выходящим из нее с температурой t_2 ;
- 3) $l x_0(i_2 - i_0)$ — потери тепла вследствие увеличения теплосодержания транзитной влаги, содержащейся в сушильном агенте при входе в сушилку.

Следовательно, не все тепло, подведенное в калорифер, расходуется на испарение влаги из материала. Чем меньше влагосодержание (x_0) воздуха, поступающего в калорифер, тем экономичнее работает сушилка.

В действительной сушилке материал, а следовательно, и влага, содержащаяся в нем, поступает в сушилку при температуре, могущей отличаться от 0°. В действительной сушилке имеются потери тепла в окружающую среду, на нагрев транспортных устройств, на подогрев высушенного материала и может иметься дополнительное поступление тепла в рабочей камере.

Составим тепловой баланс для сушилки непрерывного действия (без учета прогрева сушильной камеры):

а) Расход тепла на 1 кг испаренной влаги

1) Расход тепла на нагрев высушенного материала

$$q_{м} = \frac{c_m \cdot G_m}{W} \cdot (\theta_2 - \theta_1) \text{ кал/кг испаренной влаги,} \quad (23)$$

где: $c_m = \frac{c_0 \cdot 100}{100 + w} + \frac{w}{100 + w}$ кал/кг град. — теплоемкость материала

при абсолютной влажности $w\%$;

c_0 — теплоемкость абсолютно сухого материала в кал/кг град.

2) Расход тепла на нагрев транспортирующих устройств:

$$q_{mp} = \frac{\Sigma(G_{mp} \cdot c_{mp})}{W} (\vartheta'_{mp} - \vartheta''_{mp}) \text{ кал/кг испаренной влаги,} \quad (24)$$

где: G_{mp} — вес транспортирующих устройств, выходящих из сушилки в кг/час;

c_{mp} — теплоемкость материалов, из которых выполнены транспортирующие устройства в кал/кг град.;

ϑ'_{mp} ϑ''_{mp} — соответственно, температура транспортирующих устройств до и после сушки в град.

3) Потери тепла сушильной камерой в окружающую среду

$$q_n = \frac{\Sigma(F \cdot K \cdot \Delta t_{cp})}{W} \text{ кал/кг испаренной влаги,} \quad (25)$$

где: F — внешняя поверхность ограждений в м²;

Δt_{cp} — разность между средней температурой каждого участка сушилки и температурой окружающего пространства в град.;

K — общие коэффициенты теплопередачи в кал/м² час град.:

$$\Delta t_{cp} = \frac{t_1 + t_2}{2} - t_0; \quad K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta}{\lambda}} \text{ кал/м}^2 \text{ час град.};$$

где: α_1 — коэффициент теплоотдачи к внутренней поверхности стенки в кал/м² час град.;

α_2 — коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности стенки к воздуху в кал/м² час град.;

δ — толщина различных слоев многослойной стенки в м;

λ — коэффициент теплопроводности каждого слоя в кал/м час град.;

α_1 , α_2 и λ — определяются обычным способом*.

Приближенно можно считать:

$$K = \frac{1}{\sum \frac{\delta}{\lambda} + 0,05} \text{ кал/м}^2 \text{ час град.}$$

Расход тепла, на подогрев и испарение влаги и перегрев полученных водяных паров и на перегрев транзитных паров в воздухе (см. формулы 21 и 22):

$$q = l(I_2 - I_0) \text{ кал/кг испаренной влаги.}$$

б) Приход тепла на 1 кг испаренной влаги:

1) тепло, сообщаемое воздуху в калорифере

$$q_k = l(I_1 - I_0) \text{ кал/кг испаренной влаги};$$

2) тепло, дополнительно сообщаемое в самой сушилке,

$$q_0 = \frac{Q_0}{W} \text{ кал/кг испаренной влаги};$$

* Лурье М. Ю., Сушильное дело, изд. 1948 г.

Теплосодержание J кал на 1 кг сухого воздуха

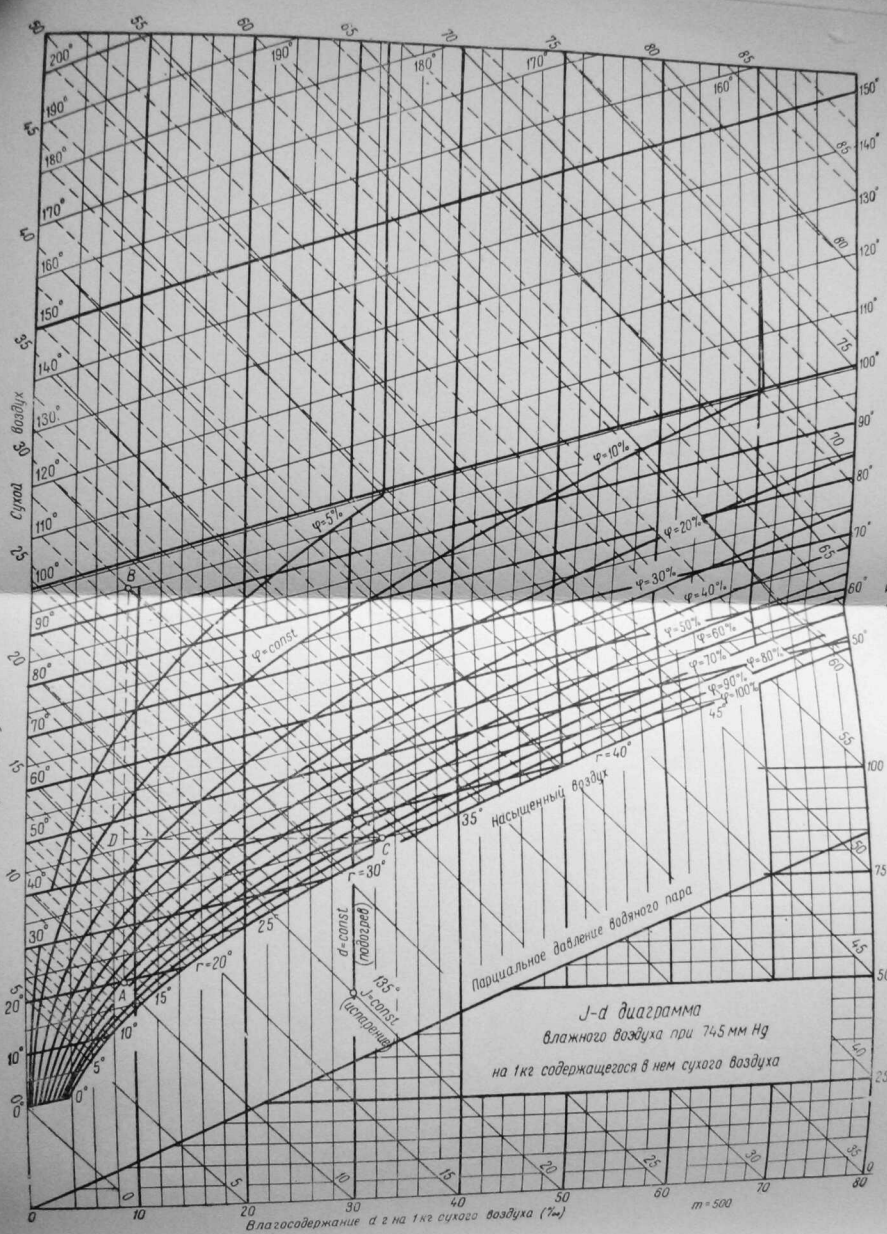


Рис. 66. J-d-диаграмма В. Т. И.

3) физическое тепло нагрева влаги, вводимой с сушильным материалом,

$$q_w = c_w \cdot \vartheta_1 = \vartheta_1 \text{ кал/кг испаренной влаги,}$$

где $c_w = 1,0$ кал/кг град. — теплоемкость воды.

Приравняв приход тепла расходу, получаем уравнение теплового баланса на 1 кг испаренной влаги:

$$l(I_1 - I_0) + q_d + \vartheta_1 = l(I_2 - I_0) + q_m + q_{mp} + q_n \text{ [кал/кг испаренной влаги.]} \quad (26)$$

После преобразования получаем:

$$l(I_1 - I_2) = (q_m + q_{mp} + q_n) - (q_d + \vartheta_1).$$

Обозначая $\Delta = (q_m + q_{mp} + q_n) - (q_d + \vartheta_1)$ кал/кг испаренной влаги получаем окончательно

$$\Delta = l(I_1 - I_2), \quad (28)$$

где Δ — потерянное или дополнительно сообщенное тепло на 1 кг испаряемой влаги.

В большинстве работающих сушилок Δ является потеряннм теплом, т. е. $\Delta < 0$.

При этом получается, что теплосодержание воздуха, поступающего из калорифера, больше теплосодержания уходящего воздуха, а именно:

$$I_1 = I_2 + \frac{\Delta}{l}, \quad (29)$$

следовательно,

$$I_1 > I_2.$$

Id-диаграмма

Аналитический расчет сушилок сопряжен с большой счетной работой. Значительное упрощение в расчеты вносит применение *Id*-диаграммы.

Автор *Id*-диаграммы, советский ученый проф. Л. К. Рамзин, впервые опубликовал ее в 1918 году. Появление *Id*-диаграммы следует считать началом научного исследования процессов сушки и развития рациональных конструкций сушильных установок.

Id-диаграмма построена для влажного воздуха, причем все величины отнесены к 1 кг содержащегося в нем сухого воздуха. На рис. 66 приведена *Id*-диаграмма Всесоюзного Теплотехнического института (ВТИ), построенная для барометрического давления в 745 мм рт. ст., которое является среднегодовым для центральных районов СССР.

На оси абсцисс диаграммы отложены влагосодержания воздуха $d \frac{\text{г. в. в.}}{\text{кг. с. в.}}$, а на оси ординат — теплосодержание воздуха $I \frac{\text{ккал}}{\text{кг. с. в.}}$.

Для более удобного расположения линий $\varphi = \text{const}$, угол β между осями координат взят равным 135° . Масштаб для отсчета d смесен на горизонтальную прямую, проходящую через начало координат.

На I - d диаграмме нанесены изотермы, т. е. линии $t = \text{const}$, соединяющие точки постоянной температуры при разных I и d . Для построения изотерм $t = \text{const}$, использовалось уравнение (12).

Кривая парциальных давлений водяного пара P_n на I - d диаграмме, нанесена в соответствии с уравнением $P_n = \frac{Bd}{622+d}$, которое получается из уравнения (7), если решить его относительно P_n .

Кривые $\varphi = \text{const}$ соединяют точки с одним и тем же значением φ , но при разных I и d .

Построение кривых $\varphi = \text{const}$ произведено на основании зависимости между температурой и парциальным давлением насыщенного водяного пара, которая находится из паровых таблиц (см. табл. 14). Так, например, для температуры $t_1 = 40^\circ$ находим из паровых таблиц $P_n = 55,2$ мм рт. ст., отвечающее $\varphi = 100\%$. На пересечении t_1 и прямой $d = \text{const}$, проходящей через точку кривой парциальных давлений $P = P_n = 55,2$, находим точку «а», которая должна лежать на кривой $\varphi = 100\%$. Для той же температуры $t_1 = 40^\circ$, но $\varphi = 60\%$, парциальное давление должно равняться $P_1 = \varphi \cdot P_n = \frac{60}{100} \cdot 55,2 = 33,2$ мм рт. ст. На пересечении $t_1 = 40^\circ$ и $P_1 = 33,2$ мм рт. ст. должна находиться точка n_1 , лежащая на $\varphi = 50\%$ и т. д. Линия $\varphi = 100\%$ разделяет I - d диаграмму на две области: нижнюю — пересыщенного воздуха (влага может находиться в каплях) и верхнюю область влажного насыщенного воздуха.

Кривые $\varphi = \text{const}$ имеют резкий перелом при температуре $99,4^\circ$, соответствующей $B = 745$ мм рт. ст. Это объясняется тем, что I - d диаграмма ВТИ построена для атмосферных сушилок, в которых парциальное давление водяного пара (когда он сам занимает все пространство) не может быть больше $P = B$, а так как $\varphi = \frac{P_n}{P} = \frac{P_n}{B}$, то эти линии $\varphi = \text{const}$ идут вертикально вверх. Расчет φ по более точным формулам дает небольшой наклон этих кривых по отношению к $d = \text{const}$.

Таким образом, любая точка I - d диаграммы характеризует состояние влажного воздуха величинами: t ; I ; d и φ .

Зная две какие-либо величины из четырех, мы можем определить остальные по I - d диаграмме. По величине d определяется P_n , как функция $f(d)$.

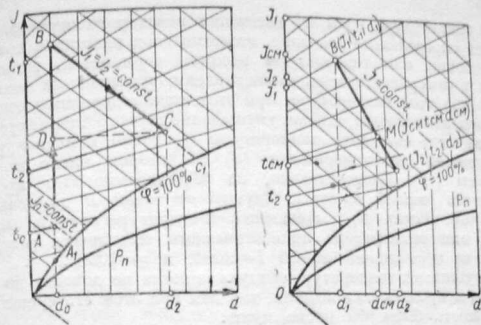


Рис. 67. а) Процесс подгрева и сушки в I - d диаграмме. б) Процесс смешения в I - d диаграмме.

Кроме того, на I - d диаграмме нанесены линии τ , которые представляют собой температуру поверхности материала в период испарения свободной влаги или температуру мокрого термометра. По заданным параметрам воздуха, можно определить $t'_m = \tau$ и $t_m = \tau$; $t'_m = t_m = \tau$. Так, например, при $t = 60^\circ$ и $\varphi = 30\%$; $t'_m = \tau = 40^\circ$, где t_m — температура материала; t_m — температура мокрого термометра.

Рассмотрим построение в I - d диаграмме основных процессов, происходящих в сушильных установках, к которым относятся: подгрев воздуха в калорифере, процесс сушки при адиабатических условиях испарения и процесс смешения воздуха различных параметров. Кроме того, на I - d диаграмме можно найти «точку росы» и температуру предела охлаждения для воздуха с определенными параметрами.

Процесс подгрева воздуха в калорифере изображается линией $d = \text{const}$, идущей снизу вверх от точки A до точки B , так как влагосодержание воздуха при этом остается без изменения (рис. 67).

Процесс сушки при адиабатических условиях испарения играет основную роль при сушке материалов. Этот процесс осуществляется при условии, что тепло, необходимое для испарения воды, получается из воздуха и расходуется только на испарение влаги. При этом имеют место следующие три физических процесса:

- 1) некоторое количество воды испаряется, увеличивая парциальное давление водяного пара в окружающем воздухе;
- 2) воздух охлаждается, так как теплота испарения берется от воздуха как единственного источника тепла;

3) температура воды по истечении некоторого периода принимает определенное значение, известное под названием предела охлаждения или температуры мокрого термометра. Давление паров у поверхности воды равно давлению насыщенных водяных паров при этой температуре. При этом теплоемкости воздуха остается неизменной, так как уменьшение первого члена формулы (12) за счет снижения температуры (t) точно компенсируется увеличением влагосодержания (d) во втором члене этой же формулы (12). Следовательно, на Id -диаграмме этот процесс выразится линией $I = \text{const}$, идущей от точки B до точки C (рис. 67). Точка C_1 , отвечающая температуре предела охлаждения или температуре адиабатического насыщения воздуха, лежит на пересечении линий $I = \text{const}$, и $\varphi = 100\%$.

В сушилках температура воздуха никогда не доводит до температуры предела охлаждения, так как при этом его сушильная способность была бы равна нулю.

Разность между температурой воздуха и температурой мокрого термометра характеризует сушильную способность воздуха, т. е. способность воздуха к насыщению водяными парами. Эта разность температур определяется психрометром.

Процесс смешения воздуха или газа различных параметров выражается на Id -диаграмме, как показано на рис. 67-б.

Этот процесс важен потому, что большинство сушилок работает с рециркуляцией воздуха или дымовых газов.

Предположим, что требуется смешать G_1 , кг горячего газа, имеющего параметры I_1, d_1 (точка B на рис. 67-б) и G_2 , кг рециркулирующего газа с параметрами I_2, d_2 (точка C на рис. 67-б).

Обозначая через $n = \frac{G_2}{G_1}$ количество кг рециркулирующих газов на 1 кг примешиваемого к нему свежего воздуха, можно написать:

$$I_1 + I_2 \cdot n = (1 + n) I_{см}; \quad (30)$$

$$d_1 + d_2 \cdot n = (1 + n) d_{см}. \quad (31)$$

Преобразуя равенства (30) и (31), получаем:

$$I_1 - I_{см} = n(I_{см} - I_2);$$

$$d_1 - d_{см} = n(d_{см} - d_2).$$

Разделив первое уравнение на второе, получаем:

$$\frac{I_1 - I_{см}}{d_1 - d_{см}} = \frac{I_{см} - I_2}{d_{см} - d_2}. \quad (32)$$

Так как это уравнение прямой линии, точка, определяющая состояние смеси, должна лежать на прямой с координатами I_1, d_1 и I_2, d_2 . Задаваясь желательной температурой смеси, находим параметры смеси в точке пересечения линии изотермы желательной $t_{см}$ температуры с линией BC (точка M на рис. 67-б). Из равен-

ства (31) можно найти количество рециркулирующего (добавляемого) газа:

$$n = \frac{d_{см} - d_1}{d_1 - d_{см}} = \frac{BM}{MC}. \quad (33)$$

Следовательно, точка M , соответствующая смеси, делит отрезки между точками B и C на части, отношение которых по правилу рычага равно величине n . Чем ниже температура смеси $t_{см}$, тем больше n .

Чтобы найти по Id -диаграмме точку росы, соответствующую какому-либо состоянию воздуха, представленному в диаграмме (точка B , рис. 67-а) достаточно провести из этой точки линию $d = \text{const}$ до пересечения с линией $\varphi = 100\%$ (точка A_1 , рис. 67-а).

Эту температуру не следует смешивать с температурой предела охлаждения воздуха при сушке. Температура предела охлаждения при $\varphi = \text{const}$ всегда выше (точка C , рис. 67-а), чем температура точки росы (точка A_1 , рис. 67-а).

Расчет сушилок по Id -диаграмме

При расчете сушилки основными величинами, подлежащими определению, являются:

- 1) расход воздуха на 1 кг испаряемой влаги — l кг/кг влаги;
- 2) расход тепла в калорифере на 1 кг испаряемой влаги — q кал/кг влаги.

Расчет указанных величин по Id -диаграмме получается просто, быстро и весьма точно.

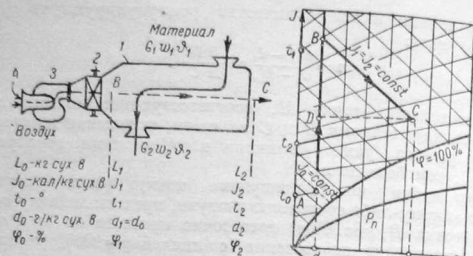
Построение процесса теоретической сушилки представлено на рис. 68-а. Как известно, в теоретической сушилке отсутствуют потери тепла $\theta_1 = \theta_2 = 0$ и $I_1 = I_2$.

Начальные параметры воздуха, поступающего в калорифер, характеризуются точкой A , имеющей параметры: $t_0; \varphi_0; d_0$ и I_0 . Процесс подогрева воздуха в калорифере, как протекший при $d = \text{const}$, т. е. $d_0 = d_1$, изобразится линией AB , параллельной оси ординат.

Конечная точка B определяет параметры воздуха после калорифера, при входе в сушилку: $I_1; d_1 = d_0; t_1$ и φ_1 . Процесс сушки идет по линии $I = \text{const}$ и изображается отрезком BC . Конечная точка C состояния воздуха при выходе из сушилки находится на пересечении линии BC с линией заданной конечной температуры t_2 или φ_2 и определяет остальные характеристики воздуха d_2, φ_2 или $t_2; \varphi_2; I_2 = I_1$.

Расход влажного воздуха в кг сухого, находящегося в нем, определяется по формуле (23):

$$l = \frac{1000 \text{ кг сухого воздуха}}{d_2 - d_0 \text{ кг испаряемой влаги}},$$



где $(d_2 - d_0)$ соответствует отрезку DC в мм.

Таким образом:

$$l = \frac{1000}{DC \cdot Md} \text{ кг/кг испаряемой влаги,}$$

где Md — масштаб влагосодержаний в г влаги/мм.

Расход тепла в калорифере на 1 кг испаряемой влаги согласно формуле (26) равен:

$$q = l(I_1 - I_0) \text{ кал/кг испаряемой влаги.}$$

На Id -диаграмме разность $(I_1 - I_0)$ выражается длиной отрезка AB в мм, умноженной на соответствующий масштаб влагосодержаний, т. е. $(I_1 - I_0) = AB \cdot M_i$; величина l может быть выражена так:

$$l = \frac{1000}{DC \cdot Md}, \text{ тогда:}$$

$$q = \frac{AB \cdot M_i \cdot 1000}{DC \cdot Md}$$

и, заменяя через $m = \frac{M_i}{Md} 1000$, получим в окончательном виде:

$$q = m \frac{AB}{CD} \text{ кал/кг испаряемой влаги.}$$

Величина m для различных типов диаграмм имеет определенное значение, в зависимости от принятых масштабов M_i и Md : [$m = 500$ и $m = 400$].

Как известно, действительная сушилка отличается от теоретической наличием потерь и добавочного поступления тепла.

Рассмотрим случай наиболее часто встречающейся сушилки, когда $\Delta < 0$, т. е. имеют место потери тепла. Процесс такой сушилки представлен на рис. 68-б.

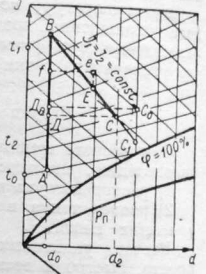
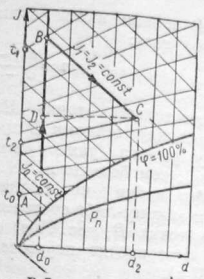


Рис. 68. а) Принципиальная схема сушилки и процесс теоретической сушилки на Id -диаграмме; б) Процесс действительной сушилки на Id -диаграмме.

1 — сушилка, 2 — калорифер; 3 — вентилятор.

Считаем, что процесс действительной сушки протекает в тех же пределах рабочего процесса, как и теоретической, т. е. t_0 и Φ_0 ; t_1 и t_2 и из величины Δ , вычисленной для действительной сушилки:

$$\Delta = (i_1 + q_0) - (q_m + q_{mp} + q_n) \text{ кал/кг испаряемой влаги.}$$

Пусть точка A определяет параметры воздуха, поступающего в калорифер, а точка B параметры воздуха по выходе из калорифера и перед входом в сушилку. Процесс подогрева воздуха, как и в теоретической сушилке, пойдет вверх по линии $d = \text{const}$.

Сначала процесс сушки строим так же, как и для теоретической сушилки, т. е. от точки B проводим вниз прямую $I = \text{const}$, до пересечения с заданной конечной температурой процесса $t_2 = \text{const}$, (точка C_0). Но так как имеют место потери тепла Δ , теплосодержание I_2 воздуха в конце процесса будет меньше теплосодержания I_1 воздуха в начале процесса т. е. $I_1 > I_2$.

Очевидно, уменьшение теплосодержания должно произойти при постоянном влагосодержании, поскольку потери тепла снижают температуру воздуха.

Следовательно, в нашем случае процесс пойдет по более крутой линии, и конечная точка переместится по вертикали вниз от точки C_0 до точки C_1 , на величину, равную потере тепла, отнесенной к 1 кг сухого воздуха, проходящего через сушилку, т. е.

$$\frac{\Delta}{t_0} \text{ кал/кг сухого воздуха, равную в масштабе отрезку } C_0 C_1.$$

Величину отрезка $C_0 C_1$ в мм можно выразить так:

$$C_0 C_1 = \frac{\Delta}{M_i \cdot t_0} = \frac{\Delta \cdot C_0 D_0 \cdot Md}{M_i \cdot 1000} = \frac{\Delta \cdot C_0 D}{m} \text{ мм.}$$

Таким образом, направление линии процесса сушки определится положением точки C .

Это же направление линии, т. е. наклон ее, можно определить на основании подобия треугольников и из соотношения:

$$E_c = \frac{ef \cdot \Delta}{m} \text{ мм.}$$

При заданной конечной температуре процесса t_2 , весь процесс в действительной сушилке выразится ломаной линией ABC .

Расход воздуха и тепла в калорифере определится по аналогии с теоретической сушилкой.

Расход воздуха на 1 кг испаряемой влаги равен:

$$l = \frac{1000}{d_2 - d_0} = \frac{1000}{CD \cdot Md} \text{ кал/кг влаги.} \quad (34)$$

Расход тепла в калорифере на 1 кг испаряемой влаги равен:

$$q = l(I_1 - I_0) = m \frac{AB}{CD} \text{ кал/кг влаги.} \quad (35)$$

Из построения процесса действительной сушки (рис. 68-б) можно сделать вывод, что для действительной сушки расход тепла и расход воздуха больше, чем для теоретической, построенной в тех же пределах рабочего процесса.

Рассмотренные процессы построения теоретической и действительной сушки являются простыми, т. е. процессами сушки без рециркуляции газов и без промежуточного подогрева.

Рециркуляция газов и ее значение в сушилах и низкотемпературных печах

При сушке или нагреве в печах некоторые материалы нельзя нагревать выше определенной температуры без вреда для их качества; так, например, при чрезмерной температуре нагрева дерева, торфа и угля в сушилах происходит их разложение и даже загорание.

Вследствие чрезмерного нагрева при обжиге может происходить сплавление и иногда частичное расплавление керамических изделий.

При излишне высокой температуре газов, поступающих в сушилку, сушка изделий может происходить слишком быстро и сопровождаться появлением трещин или короблением изделий, а также наблюдается неравномерная сушка изделий по объему камеры.

Для устранения указанных нежелательных явлений температура газов, поступающих в сушилку или в низкотемпературную печь, должна быть ограничена некоторым верхним пределом. Между тем, с целью хорошего протекания процесса горения топлива, температура в топках, а следовательно, температура продуктов горения, выходящих из топки, должна быть около 1200°, т. е. значительно выше допустимой для сушилок. Чтобы понизить температуры дымовых газов, поступающих в сушилки, к ним можно прибавлять соответствующее количество холодного воздуха и вводить в сушилку смесь дымовых газов с воздухом, с предельно допустимой для сушки температурой.

Рециркуляция также позволяет повысить влажность поступающей в сушилку смеси, что важно для сушки крупных изделий, допускающих более или менее интенсивную сушку лишь в достаточно влажной среде.

Параметры смеси дымовых газов с воздухом и материальный и тепловой балансы сушки можно рассчитать с помощью *Id*-диаграммы. Однако разбавление продуктов горения атмосферным воздухом вызывает понижение к. п. д. сушилки, т. е. лишнюю потерю тепла с отходящими из сушилки газами. Величина

$$q = V_0 \cdot c_0 (t_2 - t_0) \text{ кал,}$$

где V_0 — объем воздуха, подмешиваемого к продуктам горения в м³,

c_0 — теплоемкость воздуха в кал/м³ град;

t_2 — температура уходящих газов в град;

t_0 — температура окружающего воздуха в град.

В целях экономии тепла, для понижения температуры продуктов горения следует применять не атмосферный воздух, а часть отходящих из сушилки газов. Для этого вентилятор, забирающий отходящие газы из сушилки, выбрасывает их частично в атмосферу, а частично подмешивает их к продуктам горения, поступающим в сушилку.

При установившейся работе сушилки количество газов, выбрасываемых в атмосферу, равно количеству продуктов горения, поступающих из топки в сушилку, плюс количество водяных паров, поступающих из высушиваемого материала. Рециркулирующий газ не изменяет материального и теплового балансов сушильного устройства.

Количество тепла, уходящее из сушилки и выбрасываемое в атмосферу, соответствует тому небольшому количеству продуктов горения, которое поступает с высокой температурой из топки. Количество рециркулирующего газа получается большим. Этот газ циркулирует по замкнутому циклу, не потребляя тепла, и, следовательно, не влияет на тепловой баланс процесса. Расходуется лишь небольшое количество электроэнергии на приведение этого газа в движение.

Соотношение между количеством рециркулирующих газов и газов, поступающих из топки в сушилку и выбрасываемых в атмосферу, можно определить по правилу смешения, пользуясь *Id*-диаграммой. Для этого нужно знать параметры продуктов горения, выходящих из топки, и газов, выходящих из сушилки, и записать максимально допустимую температуру смеси газов, поступающих в сушилку. Расчет материального и теплового балансов сушилки можно производить также с помощью *Id*-диаграммы, считая, что в нее поступает прямо из топки, продукты горения не разбавленные рециркулирующим газом. Следовательно, расчет сушилок получается очень простым. Это объясняется тем, что рециркулирующий газ влияет не на материальный и тепловой балансы сушилки, а лишь на кинетику сушки и на температуру высушиваемого материала.

Несмотря на некоторое увеличение расхода электроэнергии для привода вентилятора, достоинства сушилок, работающих с рециркуляцией газов, заключаются в следующем. Можно использовать топочные газы с высокой температурой или горячий воздух от обогревательных печей, путем разбавления их до температуры, требуемой для безопасной сушки. Скорость сушильного агента у поверхности материала увеличена, что способствует возрастанию коэффициента теплопередачи и, следовательно, ускорению процесса сушки; это приводит к уменьшению расхода тепла в реальных сушильях. Температурные перепады по высоте и объему сушильной камеры минимальны, что способствует равномерной сушке изделий.

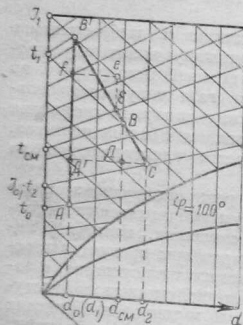
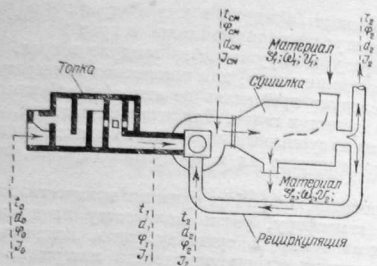


Рис. 69. а) Принципиальная схема сушилки с рециркуляцией газов. б) Построение действительного процесса сушки с рециркуляцией газов на I_d -диаграмме.

деляем конечную точку процесса C (t_2 и d_2). Часть отработанного воздуха с параметрами точки C удаляется наружу, а часть поступает (t_{cm}) и этим самым определяют положение точки B , характеризующей параметры смеси (t_{cm} и d_{cm}), которая состоит из продуктов горения с температурой t_1 и рециркулирующих газов с температурой t_2 в определенной пропорции.

Если обозначить через n количество кг рециркулирующих газов (с параметрами t_2 и d_2) на 1 кг свежих продуктов горения (с параметрами t_1 и d_1), то n на I_d -диаграмме определяется следу-

На рис. 69 а, б представлены схема работы и график построения процесса такой сушилки, работающей на горячих газах.

Параметры воздуха, поступающего в топку, характеризуются точкой A (t_0 , d_0). Точка B' характеризует параметры продуктов горения, поступающих из топки в смесительную камеру (считая приближенно $d_1 \approx d_0$ и t_1).

От точки B' проводим луч $I = \text{const}$ и по заданной величине потерь тепла в сушильной камере на 1 кг испаряемой влаги $\Delta < 0$ определяем действительное направление луча I , т. е. процесса сушки:

$$\bar{E}e = \frac{ef \cdot \Delta}{m} \text{ мм.} \quad (36)$$

где ef — произвольно заданный отрезок в мм. Задавшись конечной температурой процесса $t_2 = \text{const}$, определяем точку C (t_2 и d_2). Часть отработанного воздуха с параметрами точки C удаляется наружу, а часть поступает (t_{cm}) и этим самым определяют положение точки B , характеризующей параметры смеси (t_{cm} и d_{cm}), которая состоит из продуктов горения с температурой t_1 и рециркулирующих газов с температурой t_2 в определенной пропорции.

$$n = \frac{B'B}{CB} = \frac{D'D}{CD} = \frac{d_{cm} - d_0}{d_2 - d_{cm}} \text{ кг сухих рециркулирующих газов} / \text{кг сухих продуктов горения} \quad (37)$$

где n будет тем больше, чем ниже температура смеси t_{cm} . Количество газов, удаляемых из сушилки в атмосферу (или количество свежих продуктов горения), на 1 кг испаренной влаги будет равно:

$$l = \frac{1000}{d_2 - d_0} = \frac{1000}{CD'} \cdot M_d \text{ кг сухих продуктов горения} / \text{кг испаряемой влаги} \quad (38)$$

Расход тепла, поступающего с горячими продуктами горения на 1 кг испаренной влаги, будет равен $l(I_1 - I_0)$:

$$q = m \frac{AB'}{CD'} \text{ кал/кг испаренной влаги,} \quad (39)$$

где $m = 1000 \frac{\text{МД}}{\text{МД}}$ для диаграммы с определенным масштабом. Процесс в рассматриваемой сушилке выражается такой же ломаной линией $AB'BC$, как и в сушилке без рециркуляции, а следовательно, расходы тепла и отработанных газов получаются одинаковыми.

Расчет сушильного процесса для дымовых газов произведен так же, как и для воздуха, считая воздух и дымовые газы одинаковыми.

Экономичность процесса сушки, т. е. расход тепла и воздуха на 1 кг испаренной влаги, определяется начальными параметрами холодного воздуха и параметрами воздуха до и после сушильной камеры.

Расход тепла на 1 кг испаренной влаги уменьшается в случае: повышения температуры (t_1) поступающего в сушилку высушивающего агента при том же значении t_2 и φ_2 ; повышения t_0 при том же $d_0 = \text{const}$ и понижения t_2 при том же I_2 .

4. ВИДЫ ВЛАГИ И ЕЕ СВЯЗЬ С МАТЕРИАЛОМ

Влага, содержащаяся в глиняных материалах, подразделяется на свободную, адсорбционную или поглощенную поверхностью глинистых частиц и химическую связанную.

Свободная влага удерживается в капиллярах радиусом больше 10^{-5} см. Заполнение капилляров влагой может происходить только за счет действия капиллярных сил и только при непосредственном соприкосновении материала с водой.

Свободная влага слабо связана с материалом. Увеличение содержания ее сопровождается увеличением внешних размеров керамического изделия.

При сушке внешний объем керамических изделий уменьшается до тех пор, пока не удалится свободная влага. Уменьшение внешнего объема — усадка изделий — приблизительно равно объему удаленной свободной влаги. Поэтому свободную влагу можно назвать усадочной влагой. Можно предположить, что при удалении свободной влаги частички глины приходят в непосредственное соприкос-

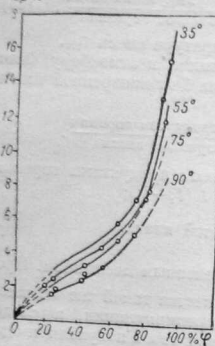


Рис. 70. Изотерма десорбции глины.

Для разных материалов и температур эта зависимость получается различной и такие кривые называются изотермой сорбции (поглощения влажности).

Влага, содержащаяся в теле в состоянии равновесия с данной атмосферой, называется равновесной влажностью (w_p %).

Влага, содержащаяся в теле и находящаяся в равновесии с атмосферой, полностью насыщененной водяными парами ($\varphi=100\%$) при данной температуре называется гигроскопической влажностью (w_g %).

Исследования показывают, что содержание адсорбционной влаги (w_p и w_g) зависит от температуры и уменьшается с повышением температуры при одинаковой относительной влажности окружающей атмосферы. Это объясняется ослаблением адсорбционных сил с повышением температуры.

Влажность тел измеряют путем высушивания образцов в сушильном шкафу при $t=105-108^\circ$ до постоянного веса.

Если количество удаляемой влаги отнести к весу влажного (исходного) материала, то содержание влаги называют относительной влажностью, а если отнести количество удаленной влаги к весу материала, высушенного при 105° , то она называется абсолютной влажностью материала. Предпочтительнее пользоваться во всех расчетах абсолютной влажностью материала.

При повышении температуры материала выше 105° происходит дальнейшее удаление адсорбционной влаги, хотя ее содержание небольшое.

новение друг с другом и поэтому дальнейшее сокращение объема становится практически незначительным.

Адсорбционная влага достаточно прочно удерживается на поверхности мелкодисперсных коллоидных частиц глинистых материалов.

Количество адсорбционно связанной влаги определяется условиями равновесия с окружающей атмосферой, т. е. температурой и относительной влажностью (t и φ). Чем больше относительная влажность (φ) атмосферы, тем больше содержание адсорбционной влаги в глин.

Зависимость содержания адсорбционной влаги от относительной влажности (φ) окружающей среды, при постоянной температуре, показана на рис. 70.

Химически связанной называется вода, входящая в состав молекул глинистых минералов.

Наибольшее количество химически связанной воды удаляется из глинистых минералов при $t=450-500^\circ$, что сопровождается необратимым изменением состава молекул. Удаление химически связанной воды не сопровождается уменьшением внешнего объема керамического изделия, а только уменьшением его веса. Объемный вес материалов при этом становится минимальным, а пористость — максимальной. Вследствие этого удаление химически связанной воды не вызывает напряжений и может протекать быстро, не приводя к разрушению изделий.

Остаток химически связанной воды удаляется при высоких температурах порядка $850-900^\circ$.

5. ДИНАМИКА СУШКИ

Процесс испарения влаги со свободной поверхности

Испарение свободной влаги с поверхности материала аналогично испарению влаги с открытой поверхности воды. Этот процесс определяется внешней диффузией влаги с поверхности испарения в окружающую среду и передачей тепла от внешней среды к поверхности испарения.

Особенность периода испарения свободной влаги заключается в том, что температура поверхности материала (или воды) приобретает определенное значение (t_n^*) и остается постоянной на протяжении этого периода, если не изменяются внешние условия.

Если материал размещен в потоке горячего воздуха (v м/сек.) с постоянной температурой (t^*) и относительной влажностью ($\varphi < 100\%$) и тепло материалу передается только от воздуха через поверхность испарения, то после прогрева поверхность влажного материала принимает постоянную температуру (t_n^*), равную пределу охлаждения воздуха на id -диаграмме или температуре мокрого термометра психрометра. При этом по законам теплопередачи поток тепла от воздуха к поверхности материала будет постоянным и это тепло будет расходоваться только на испарение влаги.

Давление водяных паров у поверхности испарения в этот период равно давлению насыщенного водяных паров при температуре поверхности (t_n^*). В этом случае создается постоянная, определяемая условиями внешней среды, разность парциальных давлений водяного пара у поверхности материала и в окружающем воздухе ($p_n - F_c$) и разность концентраций водяных паров ($c_n - c_c$), которая и определяет постоянную скорость внешней диффузии, т. е. постоянную скорость испарения влаги с поверхности материала в период удаления свободной влаги. Таким образом, при удалении свободной влаги с поверхности материала количество влаги, испаряемое с единицы поверхности в единицу времени,

остается постоянным и может быть выражено совместным уравнением теплопередачи и внешней диффузии следующим образом:

$$M_1 = \frac{W}{Z_1 \cdot F} = \beta_c (c_n - c_e) = \beta_p (p_n - p_e) = \frac{\alpha_1}{\gamma} (t_c - t_n) \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{час}} \cdot (40)$$

где: M_1 — скорость испарения (сушки) в период постоянной скорости в $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{час}$;

W — количество влаги, испаряемое в этот период, в кг ;

Z_1 — продолжительность периода постоянной скорости сушки в часах;

F — общая поверхность испарения в м^2 ;

β_c — коэффициент скорости диффузии в $\text{м}/\text{час}$;

c_n, c_e — соответственно, концентрация водяных паров у поверхности тела и в основной массе окружающей среды в $\text{кг}/\text{м}^3$;

β_p — коэффициент испарения в $\frac{1}{\text{час}}$;

p_n, p_e — соответственно, парциальные давления насыщенных водяных паров при температуре поверхности и в основной массе окружающей среды в $\text{кг}/\text{м}^2$;

t_c, t_n — соответственно, температура среды и температура поверхности испарения (материала) в град;

α_1 — коэффициент теплоотдачи от воздуха к поверхности испарения в $\text{кал}/\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{град}$;

r — теплота испарения 1 кг влаги при температуре поверхности испарения в $\text{кал}/\text{кг} \cdot \text{град}$.

Для атмосферного давления по данным сушильной лаборатории ВТИ

$$\beta_p = 0,00168 + 0,00128 v \frac{1}{\text{час}}, \quad (41)$$

где v — истинная скорость движения воздуха параллельно поверхности испарения в $\text{м}/\text{сек}$.

Величина β_c связана с величиной коэффициента теплоотдачи от воздуха к поверхности испарения следующей зависимостью*:

$$\beta_c = \frac{\alpha_1}{c_p \gamma} \frac{\text{м}}{\text{час}}, \quad (42)$$

где: $\gamma = \frac{1 + 0,001 d}{V_{1+0,001 d}}$ — удельный вес воздуха при соответствующих

его параметрах;
 $V_{1+0,001 d}$ — объем влажного воздуха на 1 кг содержащегося в нем сухого воздуха;

c_p — весовая теплоемкость влажного воздуха окружающей среды, при постоянном давлении $\text{кал}/\text{кг} \cdot \text{град}$.

* Н. Н. Доброхотов. К динамике диффузионных процессов. АН УССР, 1948.

Приближенно можно принять $c_p = 0,25$ $\text{кал}/\text{кг} \cdot \text{град}$. Коэффициент теплоотдачи α_1 определяется по общеизвестным формулам.

Остальные величины в формуле (40) находят по таблицам для влажного воздуха, причем (c_n) и (c_e) могут быть выражены с достаточной для технических расчетов точностью через удельный вес водяного пара во влажном воздухе, т. е.

$$c_n = \frac{\gamma_n}{1000} \text{ кг}/\text{м}^3 \text{ и } c_e = \frac{\gamma_e}{1000} \text{ кг}/\text{м}^3.$$

В табл. 13 γ_n — весовое содержание водяного пара в насыщенном воздухе дано в $\text{г}/\text{м}^3$ паровоздушной смеси.

Процесс сушки керамических изделий

Глина является капиллярнопористым коллоидным телом, что определяет особенности процесса ее сушки. Вследствие усадки, возникающей при испарении свободной влаги из глины, приходится учитывать факторы, влияющие на величину усадочных напряжений. Такими факторами являются режим и скорость сушки, а также природа глины. При неправильно принятом для данного сорта глины и размеров изделия режиме в изделии могут появиться трещины вследствие чрезмерно высоких усадочных напряжений.

Рассмотрим процесс сушки пластины из глины при условии, что в процессе сушки температура и влажность сушильного агента остаются постоянными и давление пара над поверхностью материала больше давления пара в основной массе сушильного агента.

Вследствие этой разности в давлении водяных паров влага в виде пара будет переходить с поверхности изделий в окружающую среду. Как известно, этот процесс испарения влаги с поверхности изделия и переход ее в виде паров в окружающую среду определяется внешней диффузией, которая связана только с параметрами внешней среды.

Так как испарение влаги происходит с поверхности материала, на поверхности его устанавливается меньшая концентрация влаги, чем внутри, что вызывает непрерывное движение влаги к поверхности. Процесс перемещения влаги внутри тела под действием разности ее концентраций обуславливается внутренней диффузией, связанной с коэффициентом внутренней диффузии и параметрами окружающей среды. Эти процессы взаимно связаны на всем протяжении сушки.

Процесс сушки сопровождается изменением веса материала во времени, вследствие удаления из него влаги.

Зная начальную влажность и вес материала, можно выразить графически изменение влажности по времени $W = f(Z)$, т.е. построить кривую сушки, изображенную на рис. 71 (кривая 1). По кривой сушки можно построить кривую изменения влажности материала

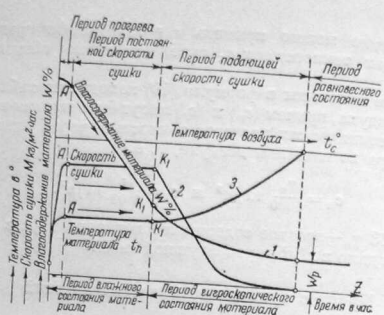


Рис. 71. Схема изменения во времени, влажности, скорости сушки и температуры материала:
 1 — влажность материала в процентах; 2 — скорость сушки кг/м² час; 3 — температура поверхности материала t_n .

ла в единицу времени, т. е. кривую скорости сушки $\frac{dW}{dz} = f(Z)$ (кривая 2).

Процесс сушки керамических изделий можно разделить на следующие основные периоды.

1. Период прогрева. После размещения материала в пространстве с повышенной температурой и влажностью $\varphi < 100\%$, происходит его прогрев и одновременное нарастание скорости сушки до максимальной величины. В конце этого периода (точка A на рис. 71) устанавливается постоянная температура поверхности и тепловое равновесие между количеством тепла, воспринимаемого изделием, и расходом тепла на испарение влаги. После этого наступает период постоянной скорости сушки.

2. Период постоянной скорости сушки. В этом периоде скорость сушки постоянна и численно равна скорости испарения влаги с открытой поверхности. Следовательно, в этом периоде происходит испарение свободной влаги с поверхности материала, и поверхность в течение этого времени остается смоченной за счет поступления влаги из внутренних слоев изделия. Температура поверхности материала t_n , равная приблизительно температуре мокрого термометра, равная меньшей в течение периода (кривая 3 на рис. 71). Давление паров над поверхностью материала равно парциальному давлению насыщенных водяных паров при температуре поверхности t_n и не зависит от влажности паров при температуре поверхности.

Указанный период является наиболее ответственным и опасной усадочные напряжения.

Скорость сушки остается постоянной до тех пор, пока среднее содержание влаги в изделии не понизится до критической $w_{к1}$ (точка K на рис. 71), а на поверхности изделия не станет равным гигроскопической влажности w_2 .

С этого момента начинается период падающей скорости сушки. Однако в действительных условиях период падающей скорости сушки может начаться и тогда, когда, вследствие неодинаковых условий испарения влаги со всей поверхности, отдельные участки достигают влажности ниже гигроскопической, в то время как другие участки имеют влажность выше гигроскопической. Следовательно, более правильно переход от периода постоянной к периоду падающей скорости сушки характеризовать точкой на кривой сушки, отвечающей $w_{к1}$, т. е. критической влажности.

Разница между $w_{к1}$ и w_2 заключается в том, что w_2 — это влажность, которую приобретает тело, если его поместить на длительный срок в среду с $\varphi = 100\%$ при данной температуре. Гигроскопическая влажность (w_2) зависит только от свойств материала и уменьшается при повышении температуры нагрева материала. Такую влажность имеет тонкий поверхностный слой изделия в конце периода постоянной скорости сушки.

Критическая влажность $w_{к1}$ представляет собой среднюю по всему изделию влажность, которая зависит от режима сушки, толщины изделия и коэффициента внутренней диффузии влаги.

При достижении изделием влажности $w_{к1}$, усадка поверхностных слоев прекращается и при дальнейшей сушке происходит лишь увеличение пористости изделия. С этого момента, как известно, начинается период падающей скорости сушки.

3. Период падающей скорости сушки характеризуется тем, что с уменьшением влажности изделия скорость сушки уменьшается в каждый последующий момент времени.

Уменьшение интенсивности испарения вызывает уменьшение расхода тепла на испарение влаги, что при прочих постоянных условиях вызывает увеличение средней температуры изделия и уменьшение температурной разности между сушильным агентом и поверхностью материала.

Уменьшение скорости сушки обуславливается тем, что парциальное давление водяных паров над поверхностью материала падает и становится меньше парциального давления насыщенных паров и становится меньше парциального давления насыщенных паров при температуре поверхности, являясь функцией температуры и влажности поверхности изделия, т. е. $p_n = f(W_n; t_n)$.

По линии $\tau = \text{const}$ на td -диаграмме и кривым равновесной влажности данного материала можно определить численные значения парциального давления пара над материалом, в зависимости от температуры и влажности поверхности материала*.

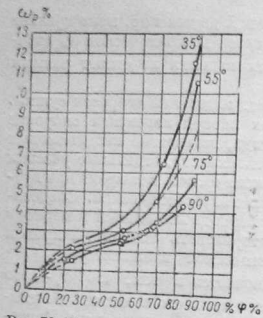


Рис. 72. Кривые равновесной влажности для латинской глины.

При достижении поверхностью материала равновесной влажности, скорость сушки становится равной нулю, т. е. удаление влаги из материала прекращается.

Величина равновесной влажности зависит от свойств материала и параметров окружающей среды, т. е. от ее температуры и влажности.

На рис. 72 приведена такая зависимость для латинской глины.

Диффузия влаги внутри тела

При сушке керамических изделий влага испаряется в основном с поверхности, а поэтому концентрация влаги на поверхности изделия всегда меньше, чем во внутренних слоях его.

Это объясняется сопротивлением, возникающим при движении влаги по капиллярным путям, и определенной степенью связанности влаги с материалом. Перемещение же влаги из внутренних слоев изделия к поверхностным вызывается внутренней диффузией, связанной с разностью концентраций влаги в указанных точках. Влага может перемещаться как в виде жидкости, так и в виде пара.

Свободная влага (влага набухания) диффундирует в виде жидкости под действием диффузионно-осмотических и капиллярных сил, подчиняясь основному закону диффузии, аналогичному с законами теплопроводности. При сушке пластины в период постоянной скорости влажность по толщине пластины распределяется по параболической кривой. По мере удаления влаги ление влаги для пластины толщиной S , при сушке ее с обеих сторон, изображено на рис. 73. Количество влаги, испаряемой с поверхности изделия в единицу времени, сохраняется постоянным.

При этих условиях градиент влаги в теле около поверхности пластины равен удвоенному градиенту влаги при стационарном потоке, т. е.

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{4(C_{сер} - C_{нос})}{S} \quad (43)$$

Количество влаги, испаряемой с единицы поверхности пластины в единицу времени, т. е. скорость сушки M_1 , выражается уравнением:

$$M_1 = D \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{4D(C_{сер} - C_{нос})}{S} \text{ г/см}^2 \text{ сек.} \quad (44)$$

где: D — коэффициент внутренней диффузии влаги в $\text{см}^2/\text{сек}$;
 $C_{сер}, C_{нос}$ — концентрация влаги * соответственно в центре и на поверхности изделий, в г/см^3 ;
 S — толщина пластины при сушке с двух сторон в см .

Уравнение (44) связывает разность концентраций влаги в центре и на поверхности пластины, со скоростью сушки и с толщиной изделия, в период постоянной скорости сушки **. Следует отметить, что подобное (рис. 73) распределение влаги может установиться по истечении времени $Z > \frac{0,075 \cdot S^2}{D}$.

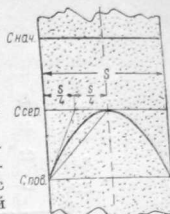


Рис. 73. Кривая распределения влаги в пластине толщиной S в периоде постоянной скорости сушки.

Коэффициент внутренней диффузии влаги

Коэффициент внутренней диффузии влаги D представляет собой количество влаги, перемещающееся в единицу времени от одной плоскости к другой, находящейся на расстоянии единицы, и имеет размерность $\text{см}^2/\text{сек}$; $\text{м}^2/\text{час}$.

Очень важно знать численную величину коэффициента D для периода постоянной скорости сушки, так как в этот период происходит усадка, и возникающие усадочные напряжения определяют разность концентраций влаги в теле изделия. Зная D , можно верно решать задачи по определению оптимальной скорости сушки керамики.

Для большинства материалов величина коэффициента D зависит от температуры и влажности материала, что подтверждается целым рядом исследований ***.

Для глины и керамических масс, при влажности ниже гигроскопической, коэффициент диффузии D зависит также от температуры и влажности. При влажности выше гигроскопической ($w > 9\%$) коэффициент D зависит только от температуры.

Можно предположить, что коэффициент диффузии D зависит только от вязкости жидкости, т. е. от температуры глины и ее природы.

Тогда для периода постоянной скорости сушки он может быть выражен уравнением

* Зависимость между C г/см^3 и абсолютной влажностью W в % выражается уравнением $C = \frac{W\rho}{100}$, где ρ — плотность абсолютно сухой глины в г/см^3 .

** Акад. Н. Н. Д о б р о х о т о в. Доклад на технической конференции МПСМ УССР, 1947.

*** Исследования ЦКТИ, ВТИ проф. А. В. Лыкова, проф. Я. М. Мишловича и др.

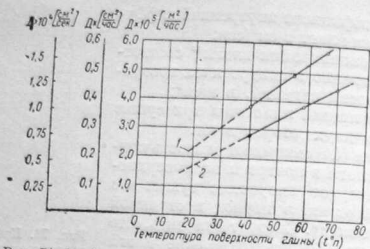


Рис. 74. Коэффициент диффузии влаги D спондиоловой кирпичной глины (1) и полтавской черепичной глины (2) при разной температуре поверхности изделия t_n , °C.

$$D = K_s \cdot \frac{1}{v} = K_s \cdot [0,03(t_n + 10)] \text{ см}^2/\text{сек.}, \quad (45)$$

где: K_s — постоянная для данного сорта глины;

v — кинематическая вязкость воды;

t_n — температура поверхности глины в град.

Формулой (45) следует пользоваться * при t_n от 30 до 80°.

Значения K_s экспериментально были определены для двух сортов глины (рис. 74):

для спондиоловой кирпичной глины — $K_s = 0,695 \cdot 10^{-4}$ см²/сек;

для полтавской черепичной глины — $K_s = 0,515 \cdot 10^{-4}$ см²/сек.

Для периода падающей скорости сушки коэффициент диффузии влаги D' определен экспериментально проф. Я. М. Миниовичем применительно к керамическим массам, состоящим из смеси 40–45% часоварской глины и 55–60% шамота:

$$D' = \left[0,2 + \frac{1,4}{373 - T} + \frac{0,3}{(13 - 0,00246 \cdot T) - w} \right] \left[\frac{T}{290} \right]^{1,4} \cdot \left(\frac{10^{-2}}{\rho} \right) \text{ см}^2/\text{сек} \quad (46)$$

где: $T \approx t_n + 273$ — температура материала в °K;

w — абсолютная влажность материала в процентах;

ρ — плотность сухой массы в г/см³.

В формуле (46) коэффициент D' представлен в зависимости от температуры материала и его влажности, когда эта влажность ниже гигроскопической и температура материала лежит в пределах от 20 до 85°.

А. В. Лыков предложил несколько оригинальных методов определения коэффициентов диффузии влаги для периода постоянной и падающей скоростей сушки**.

* А. Ф. Чижский. Журнал «Стекло и керамика» № 3, 1949.

** А. В. Лыков и Л. Я. Ауэрман. Теория сушки капиллярно-пористых коллоидных материалов пищевой промышленности, 1946.

Из сказанного следует, что коэффициент диффузии влаги D увеличивается с возрастанием температуры глины и уменьшается в период падающей скорости сушки с понижением влажности глины в области гигроскопического состояния ее.

Однако экспериментальных данных о коэффициентах D сравнительно мало, что затрудняет производство расчетов по определению оптимальных режимов сушки керамических изделий.

Термовлагопроводность в глине

Термовлагопроводностью (или термодиффузией) называется сумма явлений, обуславливающих перемещение (миграцию) влаги вследствие наличия температурного градиента влаги в глиняном теле.

А. В. Лыков экспериментально обнаружил, что под влиянием температурного градиента влага перемещается в материале по направлению потока тепла, т. е. от изотермической поверхности с более высокой температурой к изотермической поверхности с более низкой температурой.

Суммарная скорость движения влаги, перемещающейся под действием температурного градиента,

$$M = -D_t \cdot \rho \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right) \frac{\tau}{\text{см}^2 \text{ сек.}}, \quad (46a)$$

где: D_t — коэффициент термовлагопроводности в $\frac{\text{см}^2}{\text{сек. град.}}$;

ρ — плотность абсолютно сухой глины в г/см³;

$\left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)$ — градиент температуры в град/см.

Знак минус показывает, что поток влаги перемещается в сторону, противоположную направлению температурного градиента (поток влаги совпадает с направлением потока тепла).

Ниже приводится зависимость между градиентом влажности, создаваемым термовлагопроводностью, и температурным градиентом.

Известно, что при наличии градиента влажности скорость перемещения влаги в глине определяется следующим уравнением:

$$M = -D \cdot \rho \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \frac{\tau}{\text{см}^2 \text{ сек.}}, \quad (46b)$$

где: D — коэффициент внутренней диффузии влаги в $\frac{\text{см}^2}{\text{сек.}}$;

$\left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)$ — градиент влажности $\frac{1}{\text{см}}$.

Если внутри тела имеется не только градиент влажности, но и градиент температуры, уравнение влагопроводности для одномерной задачи (поток влаги будет проходить в одном направлении) напишется так:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial w}{\partial x} + D_t \frac{\partial t}{\partial x} \right).$$

Значение коэффициента термовлагодоступности для глины равно ориентировочно $D_t \approx 1,0 \cdot 10^{-3} \frac{\text{см}^2}{\text{сек. град.}}$.

Отсюда видно, что перемещение влаги за счет термодиффузии в обычных сушильных процессах происходит в ничтожно малом количестве.

Явление термодиффузии использовал в практике сушки стекловаренных горшков на заводе «Лензос» В. Н. Зимин. Об этом сказано ниже.

Усадочные напряжения и деформации при сушке

В период постоянной скорости сушки керамических изделий и в предшествующий период установления регулярного режима происходит усадка влажных изделий по мере удаления из них влаги.

Установлена следующая зависимость между линейным размером тела и его влажностью, применительно к глине:

$$l = l_1 [1 + \alpha_w (w - w_1)], \quad (47)$$

где: l — начальный линейный размер тела при влажности W_1 в см;
 l_1 — линейный размер тела при влажности W_1 в см;
 w — начальная влажность тела в процентах абсолютной влажности;

w_1 — конечная влажность тела, при которой заканчивается усадка, в процентах абсолютной влажности; для глины $w_1 \approx \alpha_n$;

α_w — коэффициент линейной усадки, который показывает относительное уменьшение линейного размера материала при удалении из него 1% влаги (равен примерно 0,006).

Абсолютная линейная усадка изделия в определенном направлении равняется:

$$\Delta l = l - l_1 \text{ см.} \quad (48)$$

Относительная линейная усадка:

$$\delta = \frac{l - l_1}{l_1} = \frac{\Delta l}{l_1} \text{ или } \delta = \frac{\Delta l}{l_1} \cdot 100\%. \quad (49)$$

Подставляя в уравнение (49) значение l из уравнения (47), получим:

$$\delta = \frac{l - l_1}{l_1} = \frac{l_1 [1 + \alpha_w (w - w_1)] - l_1}{l_1} = \alpha_w \cdot (w - w_1). \quad (50)$$

Величину δ можно выразить через разность концентраций влаги:

$$\delta = \alpha_w \frac{100}{p} (C - C_1) = \alpha_c (C - C_1), \quad (50a)$$

где α_c — коэффициент линейной усадки, отнесенный к разности концентраций влаги в 1 г/см³.

Следовательно, величина относительной усадки возрастает с увеличением разности влагодержащих (или концентраций) в теле изделия, а также с увеличением коэффициента линейной усадки α_c или α_w .

Неравномерность в распределении влаги по телу изделия вызывает различную величину усадки и связанные с ней усадочные напряжения.

Эта неравномерность в распределении влаги по телу изделия, а следовательно, неравномерность сушки может иметься по толщине изделия (рис. 73) и по его внешним габаритам. Чаще всего совмещаются оба случая.

Напряжения, возникающие при сушке изделия, пропорциональны величине усадки.

Неравномерность сушки по толщине тел простой формы (пластина, цилиндр, шар) при условии равномерной сушки их поверхности приводит к тому, что высушиваемые наружные слои скорее стремятся уменьшиться в размерах, а внутренние слои изделия, сохраняющие первоначальный размер, препятствуют усадке поверхностных слоев и находятся в сжатом состоянии. Вследствие этого на поверхности изделия возникают растягивающие усилия, могут вызвать появление трещин. Это относится к случаю, когда да концентрация влаги во всех точках поверхности одинакова, а существует только разность концентраций влаги по толщине изделия.

При одинаковой скорости сушки во всех точках тела конечных размеров концентрация влаги на некоторых участках поверхности получается неодинаковой. Эта неравномерность концентраций влаги особенно сильно проявляется при сушке плоских тел.

Сушка узких граней протекает значительно быстрее, чем центральная часть поверхности плоских изделий. Вследствие этого получается различная усадка краев изделия и смежных частей, что порождает усадочные напряжения и трещины (рис. 75).

Неравномерность концентрации влаги возрастает в изделиях сложной конфигурации, имеющих различную толщину, и особенно при неравномерном удалении влаги с поверхности изделия. Этот случай является типичным в производственных условиях и трещины в этих изделиях получаются при меньших скоростях сушки.

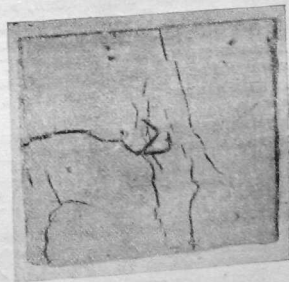


Рис. 75. Краевые трещины при сушке пластины из глины.

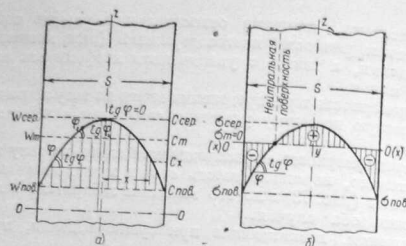


Рис. 76. Распределение влажности и усадочных напряжений при сушке пластин толщиной S в периоде постоянной скорости сушки.

Рамка, на которой лежит высушиваемое изделие, препятствует его усадке. Поэтому в изделиях большой протяженности могут возникать так называемые рамочные трещины, расположенные перпендикулярно к рамке.

Из сопротивления материалов известно, что численная величина напряжений, возникающих в теле, определяется произведением относительного удлинения или усадки δ на модуль упругости. Тогда величину возникающих напряжений в пластине, в период сушки с постоянной скоростью, можно определить, с некоторым допущением, по основному уравнению теории упругости, выведенному для термических напряжений.

Ввиду того что глина во время сушки является еще достаточно пластическим материалом, невозможно точно определить численную величину напряжений, возникающих в теле изделия при сушке по закону Гука, который применим для упругих деформаций.

Однако приводимый ниже расчет возникающих напряжений дает качественную характеристику и показывает, какие величины являются исходными и определяющими при возникновении усадочных напряжений в пластине в периоде постоянной скорости сушки.

Величина нормальных напряжений по осям z и y (рис. 76) может быть выражена следующей зависимостью:

$$\sigma = -\alpha_c \frac{\varepsilon \cdot C_x}{1-m} + \frac{1}{S(1-m)} \int_{-S/2}^{S/2} \alpha_c \cdot \varepsilon \cdot C_x \cdot dx \text{ кг/см}^2. \quad (51)$$

Для параболы:

$$C_x = C_{сер} - \left(\frac{x}{S/2}\right)^2 (C_{сер} - C_{поверх}). \quad (52)$$

Подставляя значение C_x в формулу (51) и интегрируя в пределах $\pm S/2$, получаем сжимающие напряжения внутри тела при $x=0$:

$$\sigma_c = + \frac{1}{3} \cdot \varepsilon \frac{\alpha_c (C_{сер} - C_{поверх})}{(1-m)}. \quad (53)$$

Растягивающие напряжения на поверхности тела при $x=S/2$:

$$\sigma_p = - \frac{2}{3} \cdot \varepsilon \frac{\alpha_c (C_{сер} - C_{поверх})}{(1-m)}, \quad (54)$$

где: α_c — коэффициент линейной усадки глины;
 ε — модуль упругости;
 m — число Пуассона;
 $(C_{сер} - C_{поверх})$ — разность концентраций влаги в центре и на поверхности тела.

В соответствии с этим Н. Н. Доброхотовым еще в 1945 г. было указано, что величина напряжений, порождающих трещины при сушке, зависит только от разности концентраций влаги (или влагосодержаний) в центре и на поверхности тела $(C_{сер} - C_{поверх})$ и коэффициента относительной линейной усадки α_c , но не зависит от толщины изделия S и градиента влажности при толщине изделия.

И действительно, в середине тела (рис. 76) градиент влаги равен нулю, а усадочные напряжения имеют значительную величину. В нейтральной поверхности напряжения равны нулю, а градиент влажности имеет большое численное значение ($\text{tg } \varphi$). Напряжения, пропорциональные градиенту влажности (а не разности влагосодержаний) возникают лишь в поверхностном слое изделия и направлены параллельно внешней поверхности изделия. Эти напряжения стремятся сдвинуть частицы в поверхностном слое по отношению к частицам, лежащим в более глубоких слоях изделия, и могут вызвать шелушение (скалывание тонких пленок) поверхности. Однако на практике такого явления при сушке пластических керамических материалов никогда не происходит видимо потому, что такие скалывающие напряжения никогда не достигают больших значений, а также потому, что глина не похожа на слоистые материалы.

Напряжения, пропорциональные разности влагосодержаний в теле $(C_{сер} - C_{поверх})$, возникают по толщине всего изделия, вызывая растягивающие напряжения сварку и сжимающие, в центре тела. Вследствие этого в теле изделия возникает пара сил, которая при односторонней сушке вызывает коробление изделий, а при двухсторонней интенсивной сушке может вызвать разрыв по средней плоскости изделия. Это положение подтверждается исследованиями, произведенными А. Ф. Чижским (рис. 77). В соответствии с этим следует считать ошибочной теорию возникновения трещин при сушке керамических изделий, по которой за исходную величину принимаю «градиент влажности» и в основе лежит предположение, что трещины при сушке образуются под влиянием скалывающих напряжений по поверхности, параллельной наружной поверхности изделия.

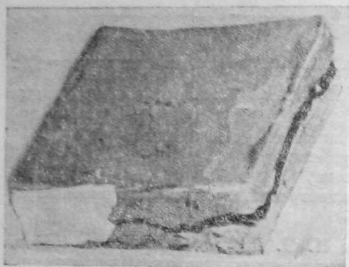


Рис. 77. Разрыв пластины из глины вследствие большой разности концентраций влаги при чрезмерной скорости сушки.

верхности плитки в единицу времени, пропорциональной толщине изделия, а минимально допустимая продолжительность сушки прямо пропорциональной квадрату толщины изделия.

Установив опытным путем для данного сорта глины допустимую разность влагосодержаний во время периода постоянной скорости сушки, можно определить оптимальный режим для любых изделий из данного сорта глины.

Скорость сушки

Скорость сушки M обычно выражается количеством влаги, удаляемой с единицы поверхности тела в единицу времени и имеет размерность $\text{кг/м}^2 \text{ час}$ или $\text{г/см}^2 \text{ сек}$.

В зависимости от сорта глины и ее прочности существует допустимая безопасная величина относительной усадки глины и соответственно, в зависимости от сорта глины, получается какая-то предельно допустимая, безопасная для прочности высушиваемого изделия, разность концентраций влаги (или влагосодержаний) в центре и на поверхности тела:

$$C_{\text{сер}} - C_{\text{пов}} = \Delta C_{\text{max}}$$

Максимально допустимая скорость сушки, определяемая из уравнения (44), для пластин толщиной S составляет:

$$M_{\text{max}} = \frac{4D \cdot \Delta C_{\text{max}}}{S} = \frac{4D \cdot \Delta W_{\text{max}}}{S} \cdot \frac{\rho}{100} \text{ г/см}^2 \text{ сек}, \quad (55)$$

где: M_{max} — максимально допустимая скорость сушки в периоде постоянной скорости в $\text{г/см}^2 \text{ сек}$;

Трещины в плитках различной толщины получаются при вполне определенной, одинаковой для данного сорта глины, разности влагосодержаний на поверхности и в центре плитки, независимо от толщины плитки и независимо от величины градиента влажности. Отсюда получается, что максимальная безопасная скорость сушки, т. е. максимально допустимое количество влаги, удаляемое с единицы по-

D — коэффициент диффузии влаги, для периода постоянной скорости в $\text{см}^2/\text{сек}$;

ΔC_{max} — максимально допустимая разность концентраций влаги в центре и на поверхности пластины в г/см^3 ;

ΔW_{max} — максимально допустимая разность влагосодержаний в центре и на поверхности пластины в процентах абсолютной влажности;

ρ — плотность сухой глины в г/см^3 , приблизительно равная $1,8 \text{ г/см}^3$;

S — толщина пластины при сушке с обеих сторон в см.

Из уравнения (55) следует, что при определенной ΔC_{max} для данного сорта глины, скорость сушки M_{max} тем больше, чем больше коэффициент D и тоньше изделие.

При $\Delta C_{\text{max}} = \text{const}$ и $D = \text{const}$ скорость сушки M_{max} обратно пропорциональна толщине изделия S .

Для различных сортов глины и одинаковых по толщине изделий M_{max} зависит от допустимой ΔC_{max} , величина которой обуславливается коэффициентом линейной усадки α_w (или α_c) данного сорта глины или так называемым «коэффициентом чувствительности» глины к сушке.

Прочность глины различных месторождений при сравнительно высокой влажности колеблется в незначительных пределах.

В табл. 15 приведены исследования А. Ф. Чижского, проведенные в сушильной лаборатории КИИ, по определению максимальных безопасных скоростей сушки пластин из сподиловой глины.

Таблица 15

Максимальная безопасная скорость сушки пластин из глины

Сорт глины	Толщина пластины S , см	Скорость сушки в первый период $M_1 \cdot 10^4$, $\text{г/см}^2 \text{ сек}$.	Приведенная скорость сушки $M_p \cdot 10^4$, $\text{г}^2 \text{ см}$	Разность влагосодержаний между центром и поверхностью Δw (% абс. влаги)	Наличие трещин*
Сподиловая глина	1,5	0,71	1,13	9,8	Нет
	1,6	0,83	1,33	11,5	Есть
	2,0	0,55	1,10	10,2	Нет
	2,0	0,66	0,32	11,0	Есть
	6,5	0,124	0,31	10,8	Есть

Из табл. 15 видно, что максимальная безопасная разность концентраций влаги для сподиловой кирпичной глины равна

* При сушке пластин краевые трещины были устранены с помощью влагозащитки и фиксировались только трещины, указанные на рис. 77.

$\Delta w \approx 10,2\%$ абсолютной влажности независимо от толщины изделия.

При рассмотрении данных по сушке изделий различной толщины нами введено понятие о «приведенной» скорости сушки M_n , т. е. скорости сушки изделия толщиной в 1 см:

$$M_n = M_1 \cdot S \frac{\text{г см}}{\text{см}^2 \text{сек.}} \quad (56)$$

Из табл. 15 следует, что «приведенная» безопасная скорость сушки для сподиловой глины находится в пределах от $0,8 \cdot 10^{-4}$ до $1,1 \cdot 10^{-4}$ г см/см² сек. С повышением температуры поверхности глины эта скорость возрастает.

Зная приведенную скорость сушки M_n для данного сорта глины, можно определить скорость сушки для изделий различной толщины. Для нахождения приведенной скорости сушки M_n достаточно высушить партию изделий одной толщины.

Из табл. 15 видно также и то, что трещины (предельные напряжения) возникают при разных градиентах влаги, но при одинаковой ДВ. Так, например, в пластине $S=1,6$ см при «градиенте влаги», равном $12,3\%$ /см трещин не оказалось, в то время как в пластине с толщиной $S=6,5$ см при градиенте $3,3\%$ /см появились трещины.

Из сказанного следует, что период постоянной скорости сушки (период усадки) является самым ответственным при сушке керамических изделий. На протяжении его изделие должно сушиться при строго определенной максимальной безопасной скорости сушки, определяемой уравнением (55), в зависимости от толщины изделия S и сорта глины.

Для расчета заданной скорости сушки изделия в сушильном установке следует составить совместное уравнение, для периода постоянной скорости сушки, и определить параметры сушильного агента из этого уравнения:

$$M_{1 \max} = \frac{4D \cdot \Delta C_{\max}}{S} = 1,14 \cdot \beta_c (C_n - C_c) \cdot \frac{1}{36000} \quad (57)$$

или

$$M_{1 \max} = \frac{4D \cdot \Delta C_{\max}}{S} = 1,14 \cdot \frac{a}{r} (t_c - t_n) \cdot \frac{1}{36000}, \quad (57a)$$

где: 1,14 — коэффициент, учитывающий увеличение скорости испарения с поверхности изделия из глины, по сравнению со скоростью испарения влаги со свободной поверхности*;

$\frac{1}{36000}$ — коэффициент для перевода скорости сушки с размерности кг/м² час в размерность г/см² сек.

* Коэффициент экспериментально определен А. В. Лыковым.

В уравнении (57) и (57a) известны такие величины, как $M_{1 \max}$ или S ; ΔC_{\max} и D . По величине D из формулы (45) определяется температура поверхности глины t_n , а значит и C_n . Задавшись скоростью движения сушильного агента v м/сек., определим a , или β_c . Последнее неизвестное t_c (или C_c) определяется после решения уравнений (57) или (57a). Таким образом находят все параметры сушильного агента (t_c ; t_n и v м/сек.).

Подобный метод расчета не вызывает особых затруднений, если сушке подвергаются изделия простой формы, и в процессе сушки распределение влаги по поверхности их остается равномерным. Несколько сложно правильно установить $M_{1 \max}$, особенно при сушке изделий сложной конфигурации.

В последнем случае нужно определить «приведенную» толщину изделия» S_n :

$$S_n = \frac{V_{\text{изд}}}{F_{\text{изд}}} \text{ см}, \quad (58)$$

где: $V_{\text{изд}}$ — объем изделия в см³;
 $F_{\text{изд}}$ — поверхность изделия в см², которая исчисляется по действительной поверхности испарения.

Найденную величину S_n подставляют взамен S в уравнение (55) или (56):

$$S = 2 \cdot S_n.$$

При отсутствии возможности определения Δw_{\max} и коэффициента D , допускаемая безопасная скорость сушки определяется опытным путем. Для этого несколько образцов высушивают при различных режимах до появления трещин и фиксируют скорость удаления влаги в единицу времени. Скорость сушки, предшествующая той, при которой получились трещины в изделии, будет искомым $M_{1 \max}$.

При определении и осуществлении максимальных безопасных скоростей сушки $M_{1 \max}$, нужно создавать такие условия при сушке, которые сводили бы к минимуму появление краевых трещин (рис. 75), вызванных неравномерным удалением влаги в различных точках поверхности тела. Эти трещины появляются при значительно меньших скоростях сушки, чем трещины, вызванные разностью концентрации влаги по толщине изделия.

От краевых трещин можно избавиться или во всяком случае свести их к минимуму различными методами, в то время как трещины, вызванные разностью концентраций влаги по толщине изделия, при чрезмерно больших скоростях сушки неизбежны. Поля, при чрезмерно больших скоростях сушки максимальными скоростями этому предельными безопасными максимальными скоростями сушки ($M_{1 \max}$) будут являться те, которые предшествуют (находясь вблизи предела) появлению трещин, вызванных разностью концентраций влаги по толщине изделия.

Скорость сушки в периоде падающей скорости может быть значительно больше, чем скорость сушки в период постоянной скорости

рости, так как в периоде падающей скорости сушки усадка отсутствует, а следовательно, отсутствуют и напряжения, порождающие трещины. В этом периоде можно сушить изделия с любой максимальной скоростью, которую может обеспечить данное воздушное устройство и параметры сушильного агента. В этом периоде для керамических изделий, в отличие от пылевых продуктов, температура поверхности не ограничивается.

Один из методов повышения скорости сушки изделий заключается в равномерном удалении влаги во всех точках поверхности изделия (центр и край), что приводит к устранению краевых трещин и повышению допускаемых скоростей сушки.

Для достижения этой цели Н. Н. Доброхотов и А. Ф. Чижский предложили узкие грани изделия (черепицы, обшивочных плит, места обрзов блоков и др.) покрывать влагоизоляцией (мазутом, машинным маслом и др.), что предохраняет края изделия от преждевременного высыхания и создает равномерную усадку по всей поверхности его. При этом брак по трещинам снижается до минимума. Этот способ проверен в производственных условиях. Длительность сушки черепицы была сокращена в 8 раз.

Второй способ равномерной сушки состоит в том, что изделия простой формы (кирпич) укладывают стенкой по 3—4 ряда, вследствие чего края оказываются защищенными от преждевременного высыхания и появления краевых трещин.

Другие методы повышения скорости сушки сводятся к следующим мероприятиям:

- 1) созданию больших скоростей сушки в периоде падающей скорости за счет повышения температуры и скорости агента сушки;
- 2) одновременному воздействию конвекции и излучения;
- 3) увеличению коэффициента диффузии влаги путем повышения температуры глины;
- 4) предварительному прогреву изделий перед наступлением периода постоянной скорости сушки (методом пропаривания и др.).

Критическая и конечная влажность изделий

Критическая влажность имеет большое значение при сушке керамических изделий, так как она определяет окончание периода постоянной скорости сушки и окончание усадки изделия. Очень важно знать и уметь определять значение критической влажности изделия. Известно, что критическая влажность зависит от ряда факторов: режима сушки, толщины изделия S и скорости сушки M_1 .

Зависимость $w_{к1}$ от указанных факторов, согласно уравнению (44) и параболическому распределению влажности по толщине изделия, может быть представлена следующими формулами: для пластины:

$$w_{к1} = w_s + \frac{100 M_1 \cdot S}{6 \cdot D \cdot \rho} \quad (60)$$

для цилиндра:

$$w_{к1} = w_s + \frac{100 M_1 \cdot R}{4 \cdot D \cdot \rho} \quad (60a)$$

для шара:

$$w_{к1} = w_s + \frac{100 M_1 \cdot R}{5 \cdot D \cdot \rho} \quad (60б)$$

где: w_s — гигроскопическая влажность в процентах;
 M_1 — скорость сушки в период постоянной скорости в г/см²·сек;
 D — коэффициент диффузии влаги в период постоянной скорости сушки в см²/сек;
 S — толщина пластины в см;
 R — радиус шара или цилиндра в см;
 ρ — плотность абсолютно сухой глины в г/см³.

Из приведенных уравнений следует, что $w_{к1}$ всегда больше w_s . С повышением скорости сушки и увеличением толщины материала $w_{к1}$ возрастает. С увеличением D и ρ критическая влажность уменьшается.

Для изделия толщиной S и плотностью ρ величина $w_{к1}$ тем больше, чем больше отношение $\frac{M_1}{D}$.

С повышением относительной влажности φ и при неизменной температуре воздуха величина $w_{к1}$ будет резко уменьшаться вследствие уменьшения M_1 и увеличения D , так как температура мокрого термометра будет возрастать, а значит будет повышаться t_n поверхности изделия. При этом отношение $\frac{M_1}{D} \rightarrow 0$.

На рис. 78 показано влияние относительной влажности воздуха (φ) на величину $w_{к1}$ при $t_c = 35^\circ$ и скорости движения воздуха $v = 2,14$ м/сек. При неизменных температурах сухого (t_c) и мокрого (t_n) термометров, увеличение скорости воздуха повышает $w_{к1}$, так как при этом скорость сушки возрастает, а коэффициент D остается неизменным, т. е. отношение $\frac{M_1}{D}$ возрастает.

При температуре сушки глины 40° , относительной влажности воздуха 30% и скорости воз-

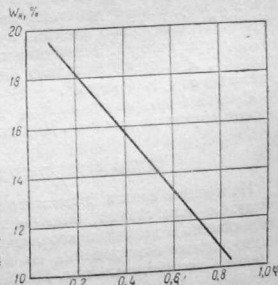


Рис. 78. Зависимость $w_{к1}$ от влажности воздуха φ (при $t_c = 35^\circ$ и $v = 2,14$ м/сек.).

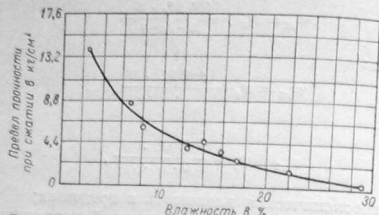


Рис. 79. Зависимость предела прочности глины от влажности.

духа 0,5; 2,15 и 5,15 м/сек. $w_{к1}$ составляет соответственно 9,8; 12,3 и 14,7%.

Влияние температуры воздуха на изменение критической влажности еще не изучено.

Величиной, имеющей большое значение является конечная влажность изделия ($w_{кон}$), при достижении которой следует заканчивать сушку. Она определяет длительность последнего этапа сушки. В свою очередь $w_{кон}$ определяет механическую прочность керамических изделий, требуемая при их укладке в штабели для обжига.

При влажности фарфоровой массы 26 и 18% предел прочности при сжатии составляет по данным А. И. Августинника соответственно 0,1 и 4,8 кг/см².

На рис. 79 представлена зависимость между влажностью и пределом прочности на сжатие для глины. При штабелях высотой в 3 м удельное давление на нижние слои равно $\sim 0,6 \div 0,8$ кг/см². Следовательно, изделия нужно сушить до такой влажности ($w_{кон}$), при которой закончилась бы полностью усадка по телу изделия, и изделие обладало бы достаточной прочностью, т. е. имело бы $\sigma_{н.п.} \geq 4$ кг/см².

Средняя по изделию $w_{кон}$ должна быть равна $\sim w_e$ и во всяком случае не выше ее. Для глины $w_e = 7,5 \div 12,0\%$.

Сушка зернистого материала в слое

На процесс сушки зернистого материала в слое, продуваемого воздухом или газом, оказывает решающее значение характер теплообмена и величина коэффициента теплоотдачи в слое. Экспериментальные исследования по вопросу теплоотдачи в слое чрезвычайно немногочисленны. Наиболее фундаментальными и интересными в этой области являются работы И. М. Федорова и Б. И. Китаева (см. литературу к главе II).

Мы кратко осветим вопрос сушки зернистого материала в слое в период постоянной скорости сушки.

В случае, если тепло в процессе сушки передается материалу только от воздуха и только через поверхность испарения (что имеет место при сушке в слое), то количество влаги, испаряемое в единицу времени с поверхности F пропорционально количеству переданной теплоты и может быть выражено следующим уравнением:

$$W = \frac{\alpha}{r} (t - t_n) \cdot F \text{ кг/час,} \quad (61)$$

где: α — коэффициент теплоотдачи от воздуха к поверхности испарения в кал/м² час град;
 r — теплота испарения влаги при температуре поверхности испарения t_n ;
 t — средняя температура воздуха в град.;
 F — поверхность нагрева 1 м³ зернистого материала в м².

Коэффициент теплоотдачи в слое зернистого материала, продуваемого газом, можно подсчитать из критериального уравнения, полученного И. М. Федоровым из опытов по сушке подмокнувшего угля в слое, которое приводится ниже:

$$Nu = 0,23 Re^{0,863}, \quad (61a)$$

где: Nu — критерий Нуссельта и Re — критерий Рейнольдса. После подстановки значений в формулу (61a), получаем:

$$\alpha = \frac{0,46\lambda \cdot \gamma^{0,863}}{\gamma^{0,863}} \frac{v^{0,863}}{d^{0,137}} = A \frac{v^{0,863}}{d^{0,137}} \text{ кал/м}^2 \text{ час град,} \quad (61б)$$

где: $A = \frac{0,46\lambda \cdot \gamma^{0,863}}{\gamma^{0,863}}$ — физические константы воздуха или газа при средней его температуре t ;
 v — скорость воздуха (или газа), отнесенная к полному сечению слоя, в м/сек.;
 d — диаметр шара, равновеликий по объему средней части вещества, заполняющего слой, в м.

Уравнения (61a) и (61б) могут быть использованы и для слоя, заполненного иными материалами.

М. Ю. Лурье предлагает для определения α упрощенное уравнение, приводимое ниже:

$$\alpha = 162 \left(1 + 0,027 \frac{t}{100} \right) \frac{v^{0,863}}{d^{0,137}} \text{ кал/м}^2 \text{ час град.} \quad (61в)$$

Поверхность нагрева 1 м³ зернистого материала F в формуле (61) может быть определена из следующих уравнений. Для несжимающихся материалов, таких, как уголь и извест:

$$F = \frac{6(1-f)}{d} \text{ м}^2/\text{м}^3. \quad (61г)$$

Для слеживающихся материалов там, где некоторая доля поверхности куска материала выключается из теплообмена:

$$F = \frac{3,5(1-f)}{2^{0,63}} M^2/m^3, \quad (64a)$$

где: d — диаметр частицы (или диаметр шара, равновеликий по объему средней частице вещества, заполняющего слой) в м;
 f — порозность слоя (в долях единицы).

Порозность слоя f может быть определена из следующего соотношения:

$$f = \frac{\gamma_{06}}{\gamma}, \quad (64e)$$

где: γ_{06} — объемный вес вещества в слое в кг/м³ (насыпной вес);
 γ — удельный вес данного вещества в кг/м³.

Температура поверхности материала (t_n) определяется по I_d -диаграмме, в соответствии с параметрами агента сушки.

Чувствительность глин к сушке

Под чувствительностью глин к сушке следует понимать склонность их к образованию трещин при одинаковой скорости сушки в период усадки.

Чувствительность глин к сушке зависит от усадки при сушке, пластичности, минералогического состава, степени дисперсности частиц и, наконец, количества адсорбированных на поверхности частиц глины катионов щелочных элементов. С увеличением количества катионов Na⁺, вследствие их высокой способности к гидратации и образованию водяных оболочек, пластичность глиняного теста увеличивается.

Тонкодисперсные глины, имеющие развитую поверхность, более пластичны. Тонкодисперсные жирные (пластичные) глины требуют для получения нормального теста большего количества воды.

Способность к поглощению катионов у различных минеральных индивидуумов неодинакова; так, например, бентонитовые глины обладают большей емкостью поглощения, а следовательно, и пластичностью, чем каолинитовые и галлуазитовые глины.

С пластичностью глины тесно связана их усадка при сушке. Глины, искусственно освобожденные от частиц размером менее 0,002 мм, приближаются к малочувствительным глинам, т. е. обладающим меньшей усадкой.

Вода, удаление которой сопровождается усадкой, называется в о д о й у с а д к и. При дальнейшей сушке в периоде падающей скорости сушки, вода удаляется из пор, образованных сближающимися частицами глины. Эта вода называется п о р о з н о й.

При ее удалении усадка отсутствует и происходит только увеличение пористости изделий.

Усадка не равна объему усадочной влаги. Усадка на единицу удаленной усадочной влаги тем больше, чем выше чувствительность глины к сушке и, следовательно, чем более дисперсна и пластична глина.

А. В. Ярошевский ввел понятие об удельной усадке ϕ :

$$\phi = \frac{v_y}{s_y} \frac{\text{усадка в см}^3}{\text{вес усадочной влаги в г}}. \quad (62)$$

Для глин с продолжительностью сушки $Z = 3 \div 4$ суток, $\phi = 0,5 \div 0,6$ и для глин с $Z = 6 \div 8$ суток, $\phi = 0,8 \div 0,9$.

З. А. Носова ввела понятие о «коэффициенте чувствительности глин», величина которого определяется из отношения объема усадки к объему пор тела:

$$K_q = \frac{v_y}{v_n} \left[\frac{\text{объем усадки см}^3}{\text{объем пор см}^3} \right]. \quad (62a)$$

Чем больше K_q , тем чувствительнее глина к сушке. Для малочувствительных глин $K_q < 1$, для среднечувствительных глин $K_q = 1 \div 2$ и для высокочувствительных глин $K_q > 2$.

Величину K_q рекомендуется определять из следующего соотношения:

$$K_q = \frac{w_y}{w_{к1}} = \frac{w_{нач} - w_{к1}}{w_{к1}}, \quad (63)$$

где: $w_y = w_{нач} - w_{к1}$ — разность между начальным и критическим влагосодержанием, которая дает воду усадки;

$w_{к1}$ — критическая влажность, удаление которой вызывает увеличение пористости высушенной глины.

Величина K_q по формуле (63) для спондиловой глины равна 1,2 и для полтавской черепичной глины — 1,8.

Показателем степени чувствительности глин к сушке служит также коэффициент относительной линейной усадки (табл. 16).

Таблица 16

Коэффициент линейной усадки глины

Месторождения	α_w
Нижнекотельское	0,007
Кучинское	0,0046
Спондилловое (Киев)	0,0047
Полтавское	0,0059

Перечисленные методы определения чувствительности глин к сушке не учитывают влияние ряда факторов на образование трещин и коэффициент внутренней диффузии влаги D . Правильнее всего определять чувствительность глины к сушке по величине максимальной безопасной скорости сушки, в период постоянной скорости (M_{1max}), определяемой по формуле (55).

Коэффициент чувствительности глины к сушке ε может быть выражен величиной, обратной приведенной безопасной скорости сушки M_n :

$$\varepsilon = \frac{1}{10^4 \cdot M_n} \cdot \text{см/сек. г.} \quad (64)$$

Чем меньше M_n , тем выше чувствительность глин к сушке.

На основании экспериментальных данных для полтавской черепичной глины $\varepsilon = 2,5$ и для спондилитовой кирпичной глины $\varepsilon = 1,0$.

Продолжительность сушки

Правильное установление продолжительности сушки изделий и материалов имеет очень большое значение, так как она влияет на производительность предприятия.

Сложность определения длительности сушки заключается в том, что некоторые факторы, влияющие на нее, пока еще трудно поддаются учету. Поэтому продолжительность сушки керамических изделий определяется опытным путем и лабораторными испытаниями.

В настоящее время, благодаря работам отечественных ученых, можно подходить к определению минимальной безопасной продолжительности сушки таких сложных тел, как керамические изделия, на основе правильных положений теории сушки, обоснованных теоретически и подтвержденных экспериментально.

На продолжительность сушки влияют следующие основные факторы:

- 1) природа материала, его структура, степень усадки и чувствительность к сушке;
- 2) размеры изделия и его форма;
- 3) начальная, конечная и критическая влажность материала;
- 4) условия теплопередачи и теплообмена;
- 5) параметры окружающей среды, температура, влажность и скорость движения сушильного агента;
- 6) равномерность удаления влаги с поверхности изделия, которая зависит от организации движения сушильного агента и конструкции сушилки;
- 7) допустимая безопасная скорость сушки M_{1max} .

Продолжительность сушки плоских керамических изделий складывается из двух периодов:

- 1) периода (Z_1) постоянной скорости сушки от начальной ($w_{нач}$) до критической ($w_{к1}$) влажности;
- 2) периода (Z_2) падающей скорости сушки от критической ($w_{к1}$) до конечной ($w_{кон}$) влажности.

Общая продолжительность сушки $Z = Z_1 + Z_2$.
Продолжительность периода постоянной скорости при двухсторонней сушке пластины толщиной S см:

$$Z_1 = \frac{W}{M_1 \cdot F}, \quad (65)$$

где: $W = G_0 \frac{w_{нач} - w_{к1}}{100}$ — количество влаги, подлежащее удалению

в течение первого периода, в г;

$G_0 = f S \rho$ — абсолютный сухой вес изделия в г;

F — поверхность испарения при двухсторонней сушке, приблизительно равная площади двух больших плоскостей изделия; $F = 2f \text{ см}^2$;

$M_1 = M_{1max} \frac{4D \cdot \Delta w}{\delta} \left(\frac{\rho}{100} \right) \frac{r}{\text{см}^2 \cdot \text{сек.}}$ — максимальная безопасная скорость сушки.

Подставляя указанные величины в формулу (65), получаем:

$$Z_1 = \frac{S^2 (w_{нач} - w_{к1})}{8D \cdot \Delta w} \text{ сек.} \quad (66)$$

При односторонней сушке такого же изделия длительность сушки будет в четыре раза больше, так как в формулу (65) следует подставлять $F = f$ и

$$M_1 = \frac{4D \cdot \Delta w}{2 \cdot S} \left(\frac{\rho}{100} \right)$$

и тогда

$$Z_1 = \frac{S^2 (w_{нач} - w_{к1})}{2D \cdot \Delta w}. \quad (67)$$

Выразив знаменатель в формулах (66) и (67) через приведенную скорость сушки M_n из уравнений (55) и (56) и приняв плотность абсолютно сухой глины равной $1,8 \text{ г/см}^3$, получим более простое выражение длительности периода постоянной скорости сушки: при односторонней сушке:

$$Z_1 = \frac{S^2 (w_{нач} - w_{к1})}{110 \cdot M_n}, \quad (66a)$$

при двухсторонней сушке:

$$Z_1 = \frac{S^2 (w_{нач} - w_{к1})}{27,5 \cdot M_n}. \quad (67a)$$

Из формул (66) и (67) следует, что для определенного сорта глины продолжительность периода сушки с постоянной скоростью пропорциональна квадрату толщины изделия, т. е. $Z_1 = f(S^2)$.

До настоящего времени считали, что продолжительность периода сушки с постоянной скоростью пропорциональна толщине изделия, т. е. $Z = f(S)$. Это следует признать ошибочным и принципиально неверным для сушки керамических изделий.

Следовательно, если продолжительность сушки пластины толщиной S_A равна Z_A , то для изделия толщиной S_B из той же глины, продолжительность сушки Z_B приближенно может быть определена из соотношения:

$$\frac{Z_A}{Z_B} \approx \frac{S_A^2}{S_B^2} \text{ или } \frac{S_A^2}{Z_A} = \frac{S_B^2}{Z_B}, \text{ откуда } Z_B = \frac{Z_A \cdot S_B^2}{S_A^2}. \quad (68)$$

В табл. 17 представлены результаты опытов, проведенных А. Ф. Чижским в сушильной лаборатории КПИ, подтверждающие указанное выше положение.

Таблица 17

Максимальная безопасная скорость сушки пластин из глины

Материалы	Толщина пластины S в см	Влажность в %		Время* сушки Z_1 в час	S^2	Фак- тор $\frac{S^2}{Z_1}$	Пали- чие трещи- н	Приме- чание
		$w_{нач}$	$w_{кон}$					
Спелдыло- вая кирпич- ная глина	1,6	29,8	16,1	0,9	2,56	2,84	Нет	Плитки суши- лись с двух сторон
	2,0	28,2	13,5	1,43	4,0	2,80	"	
	3,0	30,6	15,8	3,19	9,0	2,82	"	

Продолжительность периода сушки с падающей скоростью можно определить по приближенным формулам.

Известно, что в этом периоде скорость сушки пропорциональна среднему влагосодержанию в массе тела. Так как среднее влагосодержание постепенно уменьшается, то при неизменных параметрах сушильного агента скорость сушки постепенно падает по логарифмическому закону. Таким образом, на основании сказанного выше и при условии, что параметры сушильного агента остаются постоянными на протяжении всего периода сушки, продолжительность периода с падающей скоростью может быть определена по формуле:

$$\lg \frac{w_{кон} - w_p}{w_{к1} - w_p} = - \frac{M_1 \cdot Z_2}{1,15 (w_{к1} - w_p) S^2} \cdot \frac{100}{p}; \quad (69)$$

$$Z_2 = \frac{1,15 \cdot S \cdot p (w_{к1} - w_p)}{10 \cdot M_1} \cdot \lg \frac{w_{к1} - w_p}{w_{кон} - w_p}, \quad (70)$$

* Сушка указанных образцов при больших скоростях (в более короткие сроки) неизменно приводила к образованию трещин.

где: M_1 — скорость сушки в период постоянной скорости в $г/см^2$ сек.;

S — толщина пластины в см;

p — плотность абсолютно сухой глины в $г/см^3$ (1,8 $г/см^3$);

$w_{к1}$ — критическая влажность в процентах;

$w_{кон}$ — средняя конечная влажность, до которой высушивается изделие, в процентах;

w_p — влажность тела, равновесная с окружающей средой (сушильным агентом), в процентах.

Так как скорость сушки керамики в периоде падающей скорости может быть максимально возможной и не лимитируется температурой поверхности и возникающими напряжениями, для сокращения продолжительности этого периода рекомендуется поддерживать в сушилке максимальную температуру.

Сушилки следует проектировать так, чтобы они полностью обеспечивали продолжительность сушки, определяемую указанным выше методом. Для определения оптимального режима сушки сушилки надо конструировать так, чтобы можно было отбирать образцы в процессе сушки и контролировать потерю влаги и образование дефектов.

6. КЛАССИФИКАЦИЯ СУШИЛОК

По основному принципу действия существующие сушилки можно разделить на два класса: атмосферные сушилки и вакуумные сушилки.

В атмосферных сушилках материал сушат в атмосфере воздуха или дымовых газов при барометрическом давлении.

В вакуумсушилках материал высушивается в среде, содержащей ничтожные количества воздуха и имеющей давление паровоздушной смеси значительно ниже барометрического давления.

В сушилках обоих классов тепло передается материалу различными способами. Материал находится в покое или перемещается через сушилку различными способами.

Указанные сушилки могут быть подразделены на группы по ряду признаков. Наиболее характерными являются: способ перемещения материала и цикличность работы, способ передачи тепла к высушиваемому материалу, организация движения сушильного агента, вид теплоносителя, технологическое назначение и конструктивные отличия.

По способу перемещения материала и цикличности работы различают сушилки непрерывного и периодического действия.

По способу передачи тепла к материалу различают: конвективные, контактные, радиационные и высокочастотные сушилки.

В зависимости от организации движения сушильного агента различают сушилки с рециркуляцией и без рециркуляции сушильного агента.

По виду теплоносителя различается сушка горячим воздухом, непосредственно дымовыми газами, паром и электрической.

По технологическому назначению различают сушилки для песка, комовой глины, угля, огнеупорных изделий, тонкой керамики (фарфоровые и фаянсовые изделия) и строительной керамики (кирпич, черепица, блоки).

При классификации по конструктивному признаку в основу кладется форма рабочего пространства и характер перемещения материала в нем.

Соответственно различают: туннельные сушилки (прямоточные и противоточные), конвейерные, барабанные, шахтные, пневматические сушилки (взвешенное состояние материала), камерные, подовые и др.

7. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К СУШИЛКАМ

К сушилкам предъявляется ряд требований, обусловливаемых их назначением и характером производства.

Основными требованиями являются нижеследующие:

1. Сушилки должны легко обеспечивать изменение режима в соответствии с допускаемой безопасной скоростью сушки для определенного сорта изделий, т. е. должны давать возможность легко регулировать температуру, скорость и влажность сушильного агента.
 2. Сушилка должна обеспечивать равномерную сушку изделий по всему объему сушильного пространства и равномерное удаление влаги с поверхности высушиваемого изделия, что очень важно для плоских изделий (черепица и плитки).
 3. Сушилки должны обеспечивать максимальную скорость сушки без нарушения качества изделий.
 4. Расход тепла и электроэнергии на 1 кг испаренной влаги должен быть сведен к минимуму.
 5. Количество испаренной влаги в кг/час м³ рабочего пространства сушилки должно быть возможно больше, с целью снижения стоимости сооружения сушилки.
 6. Сушилки должны быть снабжены механизированными загрузочными и разгрузочными приспособлениями с целью сокращения длительности вспомогательных операций, облегчения обслуживания сушилки и увеличения ее производительности.
 7. Сушилки должны быть снабжены контрольно-измерительными приборами, а в больших дорогих установках — автоматическими регуляторами температуры, влажности, давления и т. д. для достижения наивысшей интенсификации процесса и получения однородной и качественной продукции.
 8. При соблюдении указанных требований сушилка должна обладать сравнительно простой конструкцией и простотой в обслуживании и регулировании.
 9. Стоимость сооружения и обслуживания сушилок на 1 кг испаренной влаги должна быть минимальной.
 10. Сушилка должна удовлетворять санитарным нормам.
- Несоблюдение перечисленных условий может привести к получению бракованных изделий или к чрезмерно длительной сушке.

8. АТМОСФЕРНЫЕ СУШИЛКИ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

К этой группе относятся сушилки, в которых загрузка и выгрузка материала происходят непрерывно и равномерно. Материал и агент сушки могут двигаться в прямом, противоточном и поперечном токе.

Прямоточные сушилки применяют в тех случаях, когда допустимы большие скорости сушки в начале процесса, чем в конце его и температура высушенного продукта не должна быть слишком высокой. Противоточные сушилки применяют тогда, когда высокие скорости сушки допустимы только в конце процесса.

К сушилкам указанной группы относятся барабанные, туннельные, конвейерные, шахтные, трубчатые, вальцовые, пневмо-сушилки и др.

Барабанные сушилки

Барабанные сушилки применяют для сушки сыпучих материалов. Благодаря надежности в работе, простоте конструкции и высокой производительности они нашли широкое применение в силикатной промышленности для сушки песка, глины, известняка, мела, угля и других материалов.

На рис. 80 показана прямоточная барабанная сушилка без рециркуляции газов.

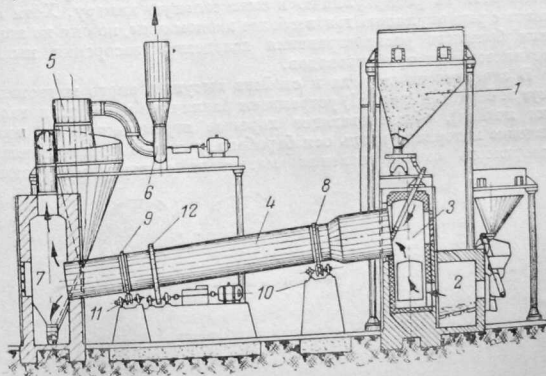


Рис. 80. Барабанная сушилка.

Сварной цилиндрический барабан 4 установлен с небольшим уклоном (3 ÷ 5°) в сторону выгрузочного конца. На барабан насажены бандажи 8 и 9, каждый из которых опирается на пару опор-

ных роликов 10 и 11. Для предотвращения смещения барабана вдоль наклонной оси устанавливают две пары упорных роликов. Привод барабана осуществляется от электромотора через редуктор, коробку скоростей и пару цилиндрических шестерен, большая из которых 12 жестко насажена на кожух барабана. Барабан обычно делает 4—6 об/мин. С обоих концов барабана имеются уплотнительные устройства, посредством которых он соединяется с газовой и разгрузочной камерой.

Загрузка материала в барабан производится из бункера 1 с помощью дозирующего механизма. По точке материал поступает в барабан. Высушенный материал высасывается в бункер, находящийся в разгрузочной камере 7 и шнеком удаляется наружу. Сушильные барабаны могут работать как на дымовых газах, так и на горячем воздухе. Чаще всего они работают на дымовых газах.

Дымовые газы поступают из точки 2 в смесительную камеру 3, где они смешиваются с отработанными рециркулирующими газами или воздухом. Из смесительной камеры газы, имеющие требуемую температуру, поступают в сушильный барабан. Отработанные газы удаляются из разгрузочной камеры с помощью вентилятора 6, предварительно пройдя в циклоне 5 для очистки от пыли. Часть отработанных газов удаляется наружу, а часть может идти на рециркуляцию в смесительную камеру. Хотя сушилки с рециркуляцией газов и более экономичны, но они не получили большого распространения вследствие засорения пылью соединительных трубопроводов.

В зависимости от рода и свойств высушиваемого материала, внутри барабана (рис. 81) устраивают различные насадки (лопасти или ячейки), обеспечивающие хорошее перемешивание и перемещение материала вдоль оси барабана, а также увеличивающие поверхность соприкосновения материала с горячими газами.

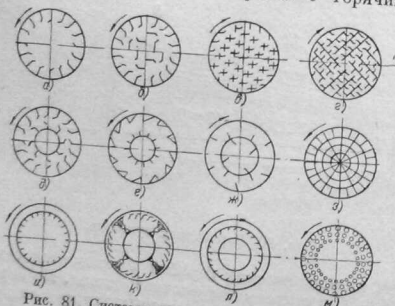


Рис. 81. Системы насадок барабанных сушил.

Таким образом, эти устройства способствуют равномерной и ускоренной сушке материала.

Насадки типа *a* применяют для крупнокусковых материалов, склонных к налипанию внутри барабана. Насадки типа *г* и *в* применяют для сыпучих, мелкокусковых материалов. Насадка *б*, образующая в барабане четыре отдельных сектора, применяется для крупнокускового материала, обладающего большим удельным весом или малой сыпучестью.

Насадка *з* применяется для мелких материалов, обладающих большим пылевидением.

Для уменьшения потерь тепла барабанные сушилки имеют двойные стенки с воздушной прослойкой, или их изолируют снаружи.

В СССР изготавливают сушильные барабаны следующих размеров: диаметр барабана $D=1,0-2,8$ м; длина $L=5-14$ м, толщина стенки $S=8-14$ мм. Соотношение между диаметром и длиной $\frac{D}{L} =$

$= \frac{1}{5} - \frac{1}{6}$. Потребная мощность мотора для привода барабана составляет 6÷25 квт.

Производительность барабанных сушилок можно характеризовать напряженностью барабана по влаге, т. е. количеством влаги, испаряемой в 1 м³ пространства барабана в час — q_w кг/м³ час. При сушке дымовыми газами в прямойочной барабанной сушилке песка от $w_{нач}=7\pm 15\%$ до $w_{кон}=0,3\pm 3,0\%$ (температура газов, входящих в барабан, $t_1=800-900^\circ$ и выходящих $t_2=100-150^\circ$) напряженность барабана по влаге равна $q_w=100-120$ кг/м³ час. Температура песка не превышает 90° .

При сушке в той же сушилке комовой глины и каолина (20—30 мм) от $w_{нач}=20-30\%$ до $w_{кон}=3-5\%$ ($t_1=700-800^\circ$, $t_2=60-100^\circ$), напряженность барабана по влаге равна $q_w=50-65$ кг/м³ час. Температура глины не превышает 100° .

При сушке угля от $w_{нач}=55-40\%$ до $w_{кон}=10-15\%$ (размер кусков 0—10 мм, $t_1=700-850^\circ$ и $t_2=150-200^\circ$) напряженность барабана по влаге равна 40÷120 кг/м³ час в зависимости от конструкции насадки. Температура угля не превышает $70-90^\circ$.

Расход тепла на 1 кг испаренной влаги зависит от рода материала и температуры газов, поступающих в сушилку. С повышением температуры поступающих газов удельный расход тепла уменьшается. В рассматриваемых сушилках расход тепла на 1 кг влаги колеблется в пределах $q=850-1100$ кал/кг влаги.

Для повышения производительности и снижения удельного расхода тепла на 1 кг влаги, следует работать с более высокими (допустимыми) температурами и с большими скоростями движения газов в барабане, которые можно создать за счет рециркуляции газов. Для предотвращения засорения трубопроводов следуют устанавливать очистительные устройства из пылевых камер и циклонов. Вытяжные устройства нужно снабжать мощными вентиляторами (дымососама).

Туннельные сушилки

Туннельные сушилки широко применяют в керамической промышленности для сушки изделий строительной керамики и огнеупоров при массовом поточном производстве.

Для сушки изделий пластического формования (кирпича, блоков, черепицы) применяют преимущественно противоточные туннельные сушилки, так как указанные изделия допускают большие скорости сушки в конце и несколько меньшие, строго определенные, скорости сушки в первом периоде.

Туннельные сушилки работают на горячем воздухе или дымовых газах. Вопрос о выборе сушильного агента решается применительно к местным условиям. Если на заводе имеются туннельные печи, целесообразно использовать горячий воздух зоны охлаждения. Там, где невозможно использовать горячий воздух из обжигательных печей, рациональнее строить сушилки, работающие непосредственно на дымовых газах. При работе на твердом топливе следует применять топки ВТИ, которые снабжены специальными устройствами для очистки дымовых газов от золы. Установка огневых калориферов для воздуха приводит к большому перерасходу топлива и значительным эксплуатационным затратам.

Загазованность пеха при отоплении сушилок дымовыми газами можно устранить надлежащим уплотнением дверей и работой сушилок под незначительным положительным давлением.

На рис. 82 показана противоточная туннельная сушилка системы Укрпромпроект, работающая на дымовых газах.

Сушилка представляет собой блок из шести туннелей (каналов). Длина каждого туннеля 36,3 м, ширина туннеля равна 1,6 м и высота от головки рельса 1,65 м. В каждом туннеле размещается 30 тележек.

Сушилка спроектирована для работы с рециркуляцией дымовых газов. Горячие газы поступают в сушилку в трех зонах по длине туннеля. У разгрузочного конца туннеля из распределительного канала через отверстия в полу туннеля подаются наиболее горячие топочные газы. В остальные две зоны из двух смежных бортов через подовые отверстия подают смесь горячих дымовых газов с рециркулирующими.

Отработанные дымовые газы удаляют из сушилки каналами 4 и попадают в магистральный боров 5, откуда удаляются вентиляторами Сирокко низкого давления № 5. Часть отработанных газов отводится вытяжными трубами, а остальные поступают на рециркуляцию по каналам 7.

В борвах 2 и 3 рециркулирующие газы смешиваются с горячими дымовыми газами, которые поступают по каналам 8. Количество рециркулирующих газов и температура смеси регулируется соответствующими шиберами.

В начале сушильного коридора установлены паровые ребристые калориферы 9 для подогрева сырца перед сушкой.

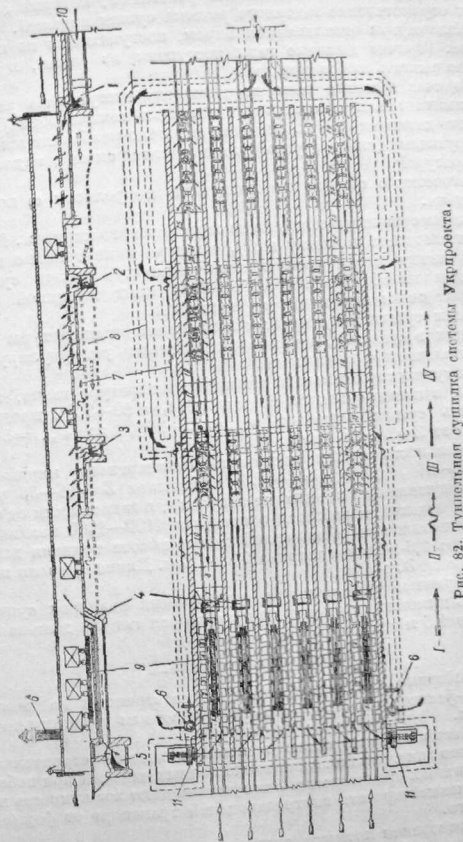


Рис. 82. Туннельная сушилка системы Укрпромпроект.

Таким образом, в сушилке созданы четыре зоны с различными температурными и влажностными режимами, которые обеспечивают осуществление заданного режима сушки изделий.

Калориферы отапливаются паром, поступающим из парового котла. Горячие дымовые газы поступают из топки, в которой можно сжигать любое топливо.

Горячие дымовые газы по дымоходу поступают в распределительный канал 10 сушилки с помощью вентилятора Сиронко низкого давления № 6¹/₂. Эти газы частично разбавляются рециркулирующими (или воздухом) для получения смеси с надлежащей температурой.

Вагонетки с сырцом перемещаются по рельсам с помощью толкателя.

Кладка сушилки выполнена из строительного кирпича. Наружные стены имеют толщину в 1¹/₂ кирпича и внутренние перегородки между коридорами в один кирпич. Потолок сушилки выполнен из сборных железобетонных плит толщиной 70 мм и покрыт слоем шлака 150 мм толщиной.

Режим сушки регулируется изменением температуры газов, входящих в сушилку, а также количеством рециркулирующих газов и температурой их смеси.

При сушке строительного кирпича температура газов, поступающих в конце сушилки составляет $t_1 = 150-200^\circ$, продолжительность сушки сырца от $w_{нач} = 22-25\%$ до $w_{кон} = 5-8\%$, составляет $Z = 24-48$ часов.

Длительность сушки шамотного стандартного кирпича от $w_{нач} = 15-21\%$ до $w_{кон} = 4-12\%$ составляет $Z = 18-36$ часов.

Расход тепла на 1 кг испаряемой влаги, в зависимости от сорта глины и изделий, колеблется в пределах 1100-1500 кал/кг.

Для достижения равномерной сушки высота туннеля должна составлять 1,6-1,8 м и ширина 1,2-1,3 м. Длина туннеля может быть равной 30-50 м.

Для равномерной сушки при указанных размерах сушилки скорость дымовых газов или воздуха по оси канала должна быть не менее 1,5 м/сек.

Конвейерные сушилки

Конвейерные сушилки широко распространены на заводах фарфоро-фаянсовой промышленности с массовым поточным производством.

Они используются также в промышленности строительных материалов для сушки плоских тонкостенных изделий при небольших масштабах производства. Эти сушилки дают возможность полностью механизировать внутризаводский транспорт от формовки до обжига.

Для ускорения процесса сушки тонкостенных изделий в последнее время большое распространение получил радиационный способ сушки.

Особенность этого способа определяется тем, что воздух провращен, а поверхность высушиваемого материала имеет высокую степень черноты и поэтому лучистая энергия поглощается непосредственно поверхностью изделия, без промежуточного подогрева воздуха. Материал быстро нагревается, что приводит к значительному повышению коэффициента диффузии влаги и температуры поверхности материала (по сравнению с температурой мокрого термометра при данных параметрах окружающей атмосферы). Вследствие этого увеличивается разность парциальных давлений пара у поверхности материала и в окружающей среде, повышающая во много раз скорость сушки изделий. Большая скорость сушки не опасна для изделий потому, что повышение коэффициента диффузии влаги приводит к весьма малой разности в концентрации влаги на поверхности и в центре изделия.

Интенсивность облучения и сушки не зависит от длины волны излучателя (его температуры), а зависит от мощности облучения, т. е. количества лучистой энергии, воспринимаемой облучаемым телом. Поэтому заслуживает большого внимания применение низкотемпературных источников облучения, как приборов недефицитных, в отличие от специальных электроламп инфракрасного облучения. Таким прибором может служить простой стальной лист, нагреваемый дымовыми газами с одной стороны и обращенный другой стороной к облучаемому изделию.

Расход тепла в радиационной сушилке соответствует ее тепловому балансу (расходу на холостой ход сушилки и полезному расходу на испарение влаги).

Для обеспечения равномерного облучения всей поверхности изделия нужно укладывать в один ряд. Таким образом, для радиационного способа сушки наиболее подходит конвейерные сушилки.

На рис. 83 и 84 показана конвейерная радиационно-конвективная сушилка для сушки тонкостенных изделий строительной керамики с отоплением природным газом*.

Внутренние размеры сушилки: длина 10 м, ширина 1,0 м и высота 3,5 м. Внутри сушилки проходит горизонтальный цепной люлечный конвейер, размещенный в четыре яруса по высоте. В сушилке размещается 60 люлек размером 750 × 250 × 300 мм. Люльки подвешены с шагом 650 мм. Загружают и выгружают материал с одной стороны сушилки.

Сушильный канал разделен по высоте на три зоны посредством четырех горизонтальных железных листов. Верхняя лента конвейера 3 проходит в первой зоне, ограниченной сверху и снизу железными листами, из которых нижний не доходит до правой тордовой стенки. Высота этой зоны 600 мм. Во второй зоне, также ограниченной сверху и снизу железными листами, проходит лента конвейера 4 и 12. Высота второй зоны 1700 мм. Нижняя лента

* Конструкция разработана группой инженеров под руководством академика Н. Н. Доброхотова.

Для регулирования температуры по длине второй и третьей зоны служат шиберы 14, 15 и 16. Регулирование производится лишь при переходе на изделия другого сорта.

Для наблюдения за качеством сушки и отбора проб служат двери 17 и окна 13.

Прогрев изделий излучением осуществляется в верхней зоне при незначительной скорости сушки. В самой нижней зоне, где изделия можно сушить с большой скоростью, имеет место одновременное воздействие конвекции и излучения. Продолжительность сушки изделий в такой сушилке должна быть в несколько раз меньше, по сравнению с существующими конвективными сушилками. Однако такие сушилки наиболее рациональны для тонкостенных изделий (плоских), которые допускают высокие скорости сушки в первый период.

9. АТМОСФЕРНЫЕ СУШИЛКИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

К этой группе относятся камерные сушилки, в которых в процессе сушки материал остается неподвижным. Загрузка и выгрузка материала происходит периодически. Такими сушилками являются подовые, стеллажные, камерные, сушильные шкафы и пр.

Все они могут работать как на горячем воздухе, так и на дымовых газах и по любому варианту сушильного процесса.

Существенными недостатками камерных сушилок являются:

- неравномерность сушки по объему камеры;
- потери тепла при загрузке и выгрузке;
- сравнительно низкая производительность 1 м^3 сушилки, вследствие большой потери времени на остывание изделий перед выгрузкой и затратой времени на загрузку и выгрузку;
- повышенный расход тепла на испарение 1 кг влаги, вследствие неплотности сушилки и недостатков, указанных выше.

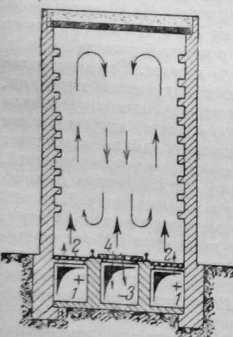


Рис. 85. Сушилка системы Ростромпроекта.

Камерные сушилки

Для сушки изделий строительной керамики наиболее распространены сушилки системы Ростромпроекта (рис. 85). По данным К. А. Нохратя-

на условия сушки в них благоприятные: неравномерность доходит до 1,3. Под неравномерностью сушки следует понимать отклонение во влажности образцов, расположенных в различных частях сушильной камеры.

Обычно блок строится из нескольких таких сушильных камер. Размеры сушильной камеры: длина 6—8 м, ширина—1,2—1,45 м и высота—2,1—2,3 м.

У пода камеры расположены каналы, подающие и отводящие газы из сушилки. Горячий воздух поступает в два распределительных приточных канала 1 и оттуда фонтанирует в сушильную камеру через отверстия в плитах, перекрывающих эти каналы.

Отработанные (насыщенные влагой) газы удаляются из сушилки отводящим каналом 3 через отверстия 4, расположенные в стенке этого канала. Так как сушилка работает с принудительной подачей воздуха от вентилятора, струйки горячего воздуха выходят из отверстий с большой скоростью и увлекают окружающий воздух (часть охлажденного и насыщенного влагой воздуха, выходящего из сушилки).

Вследствие этого создается зональная циркуляция воздуха по вертикали и температура между верхом и низом выравнивается, что приводит к равномерной сушке изделий по высоте сушильной камеры. Эти сушилки работают с рециркуляцией (газов) воздуха. Зональная циркуляция и рециркуляция воздуха (газов) способствуют ускорению процесса и равномерности сушки изделий.

Загружают сырец на брусья, укладываемые на специальные выступы в стенах сушилки. В сушилку партию сырья загружают с помощью специальных вагонеток. Двери в сушилках следует непременно делать плотно закрывающимися. Мощность сушилок в первую очередь зависит от мощности обслуживающих их вентиляторов.

Для сушки мелких керамических изделий, а также для экспериментальных работ в заводских условиях применяют специальные малогабаритные камерные сушилки или сушильные шкафы.

На рис. 86 показана камерная сушилка заводского типа конструкции А. Ф. Чижского, которая может работать на горячем воздухе и дымовых газах. Сушилка работает с рециркуляцией газов. Габариты сушилки: $2,15 \times 1,85 \times 1,65 \text{ м}$; в ней размещается тележка с восьмью полками. Размеры тележки $l=1810 \text{ мм}$, $b=1000 \text{ мм}$, $h=1600 \text{ мм}$. Расстояние между полками 180 мм .

Горячие газы поступают в сушилку двумя каналами 1, расположенными снизу. Для равномерного распределения газов по высоте сушилки на уровне каждой полки установлены регулировочные шиберы 5, угол поворота которых можно изменять в пределах от 0 до 90°. Отходящие газы удаляются с правой стороны двумя каналами 2, 3 и собираются в общий отводящий газоход 4, который соединен с вентилятором Сирокко низкого давления № 3.

нии под влиянием постоянного электрического тока. При действии постоянного тока во влажном материале происходит электро-диффузия влаги в направлении от положительного к отрицательному электроду. Действие постоянного тока дополнительно к обычным методам сушки может быть использовано для ускорения сушки крупногабаритных, трудновосхвущих изделий.

Особенно благоприятны перспективы применения высокочастотной сушки. При этом способе сушки нет необходимости в непосредственном соприкосновении влажного изделия с электродами. Нагрев можно сосредоточить в отдельных частях изделия, имеющих определенные электрические свойства (удельную проводимость, диэлектрический коэффициент), например, в наиболее влажных частях изделия.

Подобная установка ленинградского керамического института состоит из повысительно-выпрямительной подстанции, лампового генератора высокой частоты и сушильной камеры. Выпрямительная подстанция предназначена для преобразования переменного тока низкого напряжения в постоянный ток высокого напряжения (до 8 kW), необходимый для питания генераторной лампы.

Исследование работы сушилки показало, что сушка 100 кг болванки с начальной влажностью 29—30% до влажности 23—24%, с разностью влагосодержания по сечению менее 1%, может быть осуществлена за 45 минут. Болванки весом 50 кг могут быть подсушены в течение 25 мин. Расход энергии в тепловом эквиваленте составлял 3350 кал на 1 кг испаренной влаги.

Сушка изоляторов (весом во влажном состоянии 10—11 кг) при полном отсутствии брака производилась за 5,5 часа, при расходе 4100 кал на 1 кг испаренной влаги. Расход тепла на сушку мелких изоляторов при массовых загрузках сушильного контура снижался до 2700 кал на 1 кг испаренной влаги. При сушке абразивных изделий—кругов диаметром 600 мм, высотой 165 мм, весом во влажном состоянии 84 кг и потере влажности от 2,1 до 0,1%, продолжительность сушки составляла 1 час 10 мин., расход тепла—5000—6000 кал на 1 кг испаренной влаги.

Глава тринадцатая ПЕЧИ СТЕКОЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В стекловом производстве печи применяют для варки и термической обработки стекла (отжига, наводки, моллирования), сушки сырых материалов и сушки и обжига огнеупорно-керамических изделий (горшков, брусьев и пр.).

Печи для сушки и обжига керамических изделий и сырых материалов подобны аналогичным печам других отраслей силикатной промышленности и описаны в главах XII и XV.

В настоящей главе рассматриваются печи для варки и отжига стекла.

СТЕКЛОВАРЕННЫЕ ПЕЧИ

1. ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ В ПЕЧАХ

В загружаемой в горшок или бассейн шихте под действием тепла и частично под влиянием воздействия газов происходит превращение, в результате которых получается стекломасса.

Основным компонентом большинства практических стекол является кремнезем. Различные добавки к нему служат для облегчения практического стекловарения и придания стеклу требуемых свойств. Понижение температуры плавления и вязкости стекла, придание химической устойчивости и некоторых других свойств достигается введением материалов, содержащих Na_2O , K_2O , CaO , Al_2O_3 , MgO , BaO , PbO и ZnO . Практические стекла содержат помимо кремнезема значительные количества Na_2O и CaO . Основными компонентами шихт являются песок, сода, сульфат и известняк.

Специальные требования к свойствам стекол обуславливают введение в шихту специальных веществ для окрашивания, гашения, обесцвечивания и осветления стекол.

Различают следующие стадии стекловарения: стеклообразование, или собственно варку, дегазацию и студку.

При стеклообразовании происходят физические и химические процессы, состоящие в повышении температуры и испарении содержащейся в ней влаги, плавлении и улепешивании отдельных компонентов, разложении гидратов, карбонатов, сульфатов и нитратов, взаимодействии компонентов, образовании силикатов и растворении веществ в образовавшемся расплаве.

Поверхностный слой загруженной в печь шихты очень быстро нагревается до высокой температуры. Остальная часть слоя вследствие низкой теплопроводности шихты еще долго остается холодной. При температуре поверхности слоя шихты, близкой к 1300°, лишь через 6 и более минут.

При сильном нагреве исходные материалы и продукты реакций интенсивно взаимодействуют между собой и хорошо перемешиваются выделяющимися газами, что приводит к быстрому получению стекломассы.

Образующийся на поверхности слоя шихты расплав стекает, подогреваясь в дальнейшем дегазации. Если остатки шихты уносятся потоками стекла в глубь стекломассы, то провар их затрудняется.

Обычно в шихте содержится стеклянный бой в количестве 15—30% веса шихты. Наличие боя усложняет и облегчает варку. Основным фактором, определяющим скорость стеклообразования, является температура.

Целью дегазации является удаление из полученного расплава газов, выделившихся в процессе разложения и взаимодействия компонентов шихты и механически включенных, устранение ячеистой структуры расплава и выравнивание состава стекломассы.

Скорость поднятия пузырьков газов обратно пропорциональна вязкости стекломассы. Глубокое погружение в стекломассу, попадание в более холодные слои и малый размер пузырьков затрудняют их выделение.

При дегазации стекломасса должна находиться в достаточное время в состоянии пониженной вязкости, т. е. при высокой температуре. Выделение пузырей способствует гомогенизации массы. Для улучшения гомогенизации в горшковых печах применяют бурление и перемешивание.

Дегазированную стекломассу охлаждают в печах повышения вязкости, до необходимой для выработки.

Протекание процессов стеклообразования и дегазации и качество получаемой стекломассы зависит от ее состава, измельчения и смешения сырых материалов, температуры в печи и состава газовой среды. Увеличение поверхности соприкосновения частиц шихты и количества передаваемого ей тепла, так же как и понижение плавкости шихты, увеличивают скорость стеклообразования. От состава газовой среды зависит диссоциация соединений, образующих стекломассу, и взаимодействие с последней газов.

2. ТИПЫ ПЕЧЕЙ

В зависимости от режима работы различают стекловаренные печи непрерывного и периодического действия. В печах непрерывного действия отдельные стадии процесса стекловарения протекают в различных частях печи и выработка ведется непре-

рывно. В печах периодического действия все стадии протекают в одном объеме и выработка ведется периодически.

По устройству рабочей камеры стекловаренные печи разделяются на горшковые и ваннные. Горшковые печи относятся к печам периодического действия. Ваннные печи могут быть как периодического, так и непрерывного действия.

Наибольшее распространение имеют ваннные печи непрерывного действия. Они более экономичны, обладают большей производительностью, удобны в обслуживании и легко допускают механизацию выработки.

Горшковые печи применяют лишь в специальных случаях, главным образом, для варки высококачественных оптических, технических и художественных стекол в небольших количествах. Стеклomасса, получаемая в горшковых печах, более гомогенна, чем получаемая в ваннных печах, и влияние остаточной стекломассы в горшковых печах не столь велико. Экономия в расходе топлива, достигаемая применением ваннных печей непрерывного действия, при варке перечисленных стекол не имеет существенного значения. В то же время возможность воздействовать на небольшое количество стекломассы в горшке путем бурления, изменения состава шихты, режима варки и т. д. или же возможность очистки горшка облегчает получение стекломассы высокого качества.

Иногда применение горшковых печей определяется методом выработки. Так, в производстве зеркального стекла методом литья стекломассу варят в горшках и выливают на литейный стол с помощью крана. Горшковые печи применяют также при одновременной варке стекол различных составов.

При высоких температурах варки и выработки и отсутствии достаточно стойких огнеупорных материалов применение ваннных печей непрерывного действия нецелесообразно вследствие трудности разделения варочной и выработочной частей бассейна. В этих условиях вводимые в стекломассу перегородки интенсивно разбедаются, а при значительном погружении проходящая под ними стекломасса сильно охлаждается. Применение горшковых печей для варки стекол, требующих высоких температур варки, нежелательно вследствие сильного износа горшков.

В подобных случаях при варке малых количеств стекла иногда устанавливают ваннные печи периодического действия. В этих печах отсутствуют погруженные в стекломассу раздельные приспособления. Материал бассейна, имеющий более низкую температуру, чем горшок, разрушается значительно слабее. Однако в этих печах проявляется влияние остаточной стекломассы.

3. СХЕМА РАБОТЫ СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ

Подвод тепла. Для провара шихты, загружаемой в печь, требуется длительное воздействие высокой температуры (1500—

1800°) и подведение достаточного количества тепла. Для этой цели используют топлино или электроэнергию. Последняя применяется, если необходимо получить температуру выше 1600° для пламенных печи. Распространены преимущественно

Для охлаждения стекловаренных печей твердое топливо непосредственно не применяется, так как в рабочей камере необходимо создавать очень высокие температуры и должна иметься возможность хорошего регулирования горения.

Кроме того, при непосредственном применении твердого топлива стекло может загрязниться.

Основным топливом для стекловаренных печей является паровоздушный генераторный газ. В соответствии с местными условиями находят применение и другие газы и нефтьотопливо. Стекловаренные печи снабжают регенераторами и рекуператорами.

Движение газов. В пламенных печах непрерывно движутся газы, являющиеся теплоносителем и отдающие свое тепло (рис. 87, см. вклейку).

Движение газов в рабочей камере вызывается геометрическим напором, возникающим в самой печи, а иногда дополнительно приспособлениями, вылетающими газы и воздух. Отвод газов из рабочей камеры достигается тягой дымовой трубы или дымососами.

В рабочую камеру газы подаются таким образом, чтобы обеспечить требуемые режим и теплоотдачу. В ваннных печах пламя обычно направляют на стекломассу, чтобы снять с ее поверхности остывший и препятствующий теплоотдаче слой газов.

Обычно воздух направляют над газом, так как менее лучепрозрачный газ быстрее прогревается в печи и поднимается вверх. При желании создать окислительную атмосферу в печи и получить длинный факел, подводят воздух ниже газа или выводят подсос его снаружи на зеркало.

Теплопередача. В пламенных стекловаренных печах теплоносителем являются продукты горения. В пламенном пространстве печи продукты горения отдают тепло кладке печи и нагреваемым материалам.

Теплоотдача происходит преимущественно излучением. Часть тепла, передаваемого кладке, теряется наружу, а остальное тепло излучается и отражается кладкой внутрь печи. Часть излучения кладки поглощается газами, а остальное пропускается и нагревает материалы. С увеличением степени черноты факела увеличивается количество тепла, передаваемого газам, но пропускается меньшая часть излучения кладки, и наоборот. Поэтому с увеличением степени черноты и размеров факела уменьшается значение излучения кладки для нагрева материалов. Небольшое количество тепла передается конвекцией от газов. Стекломасса в известной мере прозрачна для излучения факела и кладки. Поэтому в теплообмене могут принимать участие слои стекло-

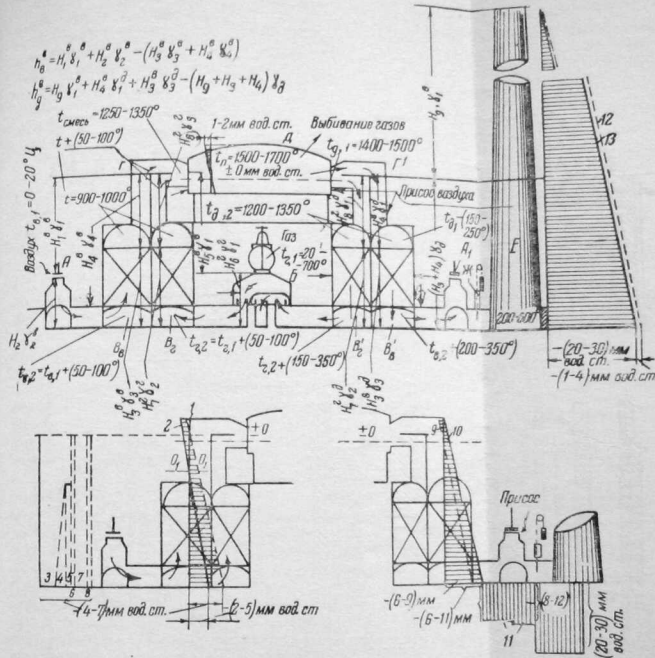


Рис. 87. Движение газов и распределение температур и давлений в стекловаренной печи:

1—распределение давлений пневмометрических (или статических) в регенераторах и горелках, подающих газ и воздух при отсутствии движения газов; 2—то же при движении газов; 3—сопротивление переходного клина, канала в регулирующего клапана; 4—сопротивление насытки; 5—сопротивление (местное) вертикальных каналов; 6—сопротивление от трения вертикальных каналов; 7—сопротивление горизонтальных каналов и влета горелок; 8—сопротивление в результате положительного давления в печи; 9—распределение давлений в горелках в регенераторах, отводящих продукты горения при отсутствии движения газов (дымовой шибер спущен); 10—то же при движении газов; 11—распределение давлений в наклоне для отведения газа; 12—распределение давлений в дымовой трубе при отсутствии движения газов; 13—то же при движении газов; А—воздушный переходной клапан в положении, позволяющем воздуху; А₁—то же в положении отвода дымовых газов; В₁—воздушной рекуператор; В₂—воздушный регенератор, подводящий воздух; В₃—воздушной рекуператор, отводящий дымовые газы; В₄—газовый регенератор, подводящий газ; В₅—газовый регенератор, отводящий дымовые газы; Г и Г₁—горелки, подающие газ и воздух и отводящие дымовые газы; Д—пламенное пространство; Е—дымовая труба; И—шибер.

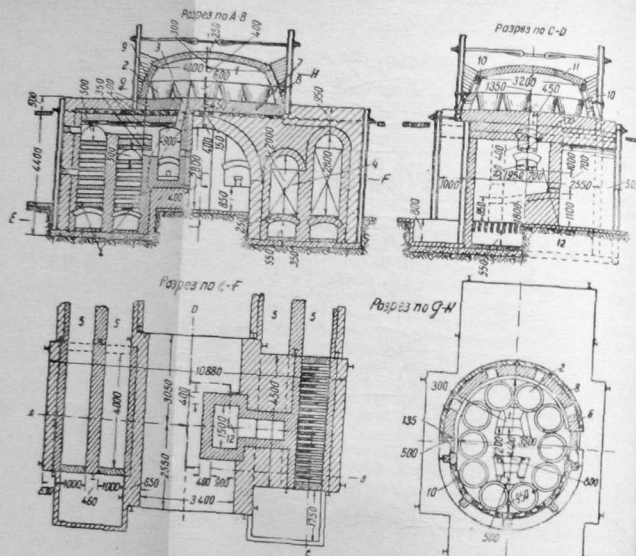


Рис. 92. Горшковая печь с кадиновыми горшками:
 1—рабочий намер; 2—горшки; 3—горелки; 4—регенераторы; 5—навалы; 6—обвалка;
 7—под; 8—опорка; 9—бычки; 10—рабочие окна; 11—свод; 12—носкиды.

массы, находящиеся на некоторой глубине, а в известных случаях и кладка бассейна.

Обычно теплоотдача в печи ограничивается температурой кладки, которую поддерживают постоянной.

Результаты расчетов теплообмена в пламенном пространстве, произведенные по формулам, которые приведены в главе III, представлены на рис. 88. При расчете рассмотрены варианты наличия факелов различных размеров в печи с площадью варочной части 6×12 м и пламенным пространством высотой 1,8 м.

Из формулы (20) главы III следует, что поверхность слои шихты должна быть возможно больше. Далее из графиков рис. 88 видно, что при постоянных температурах стекломассы и кладки с уменьшением размеров и степени черноты факелов суммарная теплоотдача стекломассы возрастает вследствие увеличения допустимой температуры газов, если свойства топлива допускают ее достижение. При малой степени черноты факела количество тепла, передаваемого кладкой, значительно. С приближением факела к поверхности кладки температура газов должна быть снижена. Стыющийся факел малых размеров, движущийся по поверхности стекломассы, обеспечивает лучшую теплоотдачу, чем несветящийся факел больших размеров. Если свойства огнеупорных материалов не лимитируют подъема температуры, желательнее сплошное покрытие зеркала факелом с большой степенью черноты.

Расчеты по теплообмену в пламенном пространстве приводят к следующим выводам.

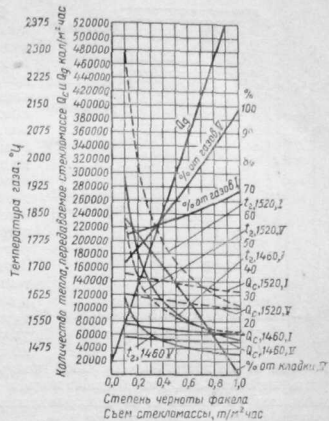


Рис. 88. Теплоотдача стекломассе в пламенном пространстве в зависимости от степени черноты факелов при постоянных температурах поверхности кладки.

Кривые Q_1 —количество тепла, передаваемого стекломассе с температурой 1400° ; кривые t_1 —температура газов; кривые 1460 и 1520—постоянная температура факела; 1—факелы, толщиной 0,6 м и шириной 1,2 м; X—полное выделение факелом пламенного пространства; кривые Q_2 —количество тепла, необходимого для получения стекломассы в зависимости от ее объема.

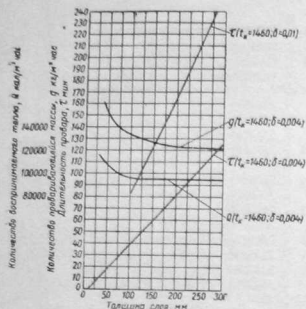


Рис. 89. Провар шихты:
 δ — толщина проваривающегося слоя;
 t_k — температура кладки.

полагая ее на достаточно большой поверхности печи. Всякое усовершенствование, допускающее подъем температуры в печи, позволяет увеличить ее производительность и, следовательно, уменьшить удельный расход топлива.

Для определения количества тепла, передаваемого шихте и стекломассе, недостаточно произвести расчет теплообмена в пламенном пространстве. Его нужно подтвердить расчетом теплообмена в шихте и стекломассе. Расчет прогрева, а следовательно, и скорости провара шихты производит, принимая, что стеклообразование протекает в две стадии:

1) в течение первой стадии происходит прогрев тонкого поверхностного слоя шихты, сохраняющего неизменные свойства до средней температуры 900°, при которой в шихте интенсивно протекает реакция стеклообразования, и она превращается в расплав с другими, но тоже неизменными свойствами;

2) во второй стадии образующийся расплав прогревается до температуры 1350—1400°, при которой слой стекломассы стекает с поверхности слоя шихты.

Эти расчеты (рис. 89) показывают, что основным фактором, определяющим скорость провара шихты, является стекание поверхностного слоя. Увеличение толщины стекающего слоя приводит к возрастанию требуемой длительности прогрева, так как при этом затягивается прогрев шихты, необходимый для образования поверхностного слоя стеклообразной массы, которая быстро нагревается и стекает. Малая теплопроводность шихты является положительным фактором. Незначительный отвод тепла внутрь слоя шихты способствует прогреву и стеканию поверхностного

Вблизи места сыпки шихты следует и можно поддерживать достаточно высокую температуру. Ввиду низкой температуры стекломассы (шихты) и кладки в эту часть печи нужно подавать возможно большее количества топлива и воздуха. В зоне дегазации стекломасса передается сравнительно небольшое количество тепла и требуемый подъем температуры легко достигим. Этот подъем лимитируется температурой кладки лишь в случае высокой температуры дегазации. Следует увеличивать обогреваемую поверхность шихты, расходуемого конвекционными потоками нижней поверхности слоя, сравнительно невелико.

Движение потоков стекломассы. Движение стекломассы обусловлено ее неодинаковым удельным весом в горизонтальных и вертикальных слоях, а также выработкой. Различие удельного веса стекломассы является результатом изменения ее температуры, а также свойств в стадии провара. Неодинаковый удельный вес в горизонтальных слоях имеет следствием возникновение выталкивающих сил и конвекционных потоков стекломассы.

В горшковых печах неравномерное распределение температур в стекломассе обуславливает опускание стекломассы у более холодных стен и подъем у более горячих.

Эпюры сил, действующих в сечении ванны, приведены на рис. 90. Они характеризуют давления, возникающие в различных частях бассейна.

При отсутствии разделительных приспособлений в бассейне высота слоя легкой стекломассы должна быть больше высоты слоя тяжелой, и следовательно, появляется тонкий поверхностный слой, растекающийся по зеркалу стекломассы.

Совмещенная эпюра давлений показывает, что силы, действующие в верхней части слоя, вынуждают стекломассу течь в направлении от более нагретых частей к менее нагретым (т. е. к стеклу в выработочную часть), а ниже нулевой (нейтральной) нам и в выработочную часть). Таким образом, часть стекломассы циркулирует между варочной и выработочной частями. Отношение количества поступающей в выработочную часть стекломассы и вырабатываемой называют коэффициентом потока.

На рис. 90 также показана эпюра скоростей по высоте. Плоскости с учетом изменения вязкости стекломассы по высоте. Плоскости нулевых скорости и разности давлений не совпадают.

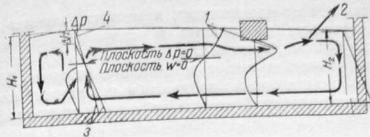


Рис. 90. Эпюры сил и скоростей в сечении бассейна: H_1 — высота слоя стекломассы в области минимальных температур и H_2 — в области максимальных; ΔH — разность высот слоя в областях максимального и минимального температур; Δp — разности давлений стекломассы по горизонтали в областях максимума и минимума температур;

1 — эпюра скоростей; 2 — выработочный поток; 3 — эпюра давлений в выработочной части; 4 — то же в варочной части.

В зависимости от направления и местоположения различают потоки поперечные, продольные и спиралеобразные, поверхностные и глубинные, прямые и обратные.

Особенное значение имеют продольные потоки. Максимальная скорость этих потоков, по данным различных исследователей, составляет в варочной части 12 м/час и в студочной 14 м/час.

4. ГОРШКОВЫЕ ПЕЧИ

Режим работы

В горшковой печи все стадии варки (провар, дегазация, студка) протекают последовательно в одном объеме. На рис. 91 представлен режим варки зеркального и сортового стекла в горшковых печах.

К началу периода собственно варки печь прогревают, после чего в несколько приемов ручным ковшом или завалочной машиной загружают шихту. Обычно первая засыпка состоит из боя, плавящегося при более низкой температуре. Температура в печи постепенно поднимается, и дальнейшие засыпки состоят из смеси сырых материалов и иногда из боя. Часто после провара шихты горшки догружают боем. При проваре шихты расплав, образующийся на поверхности слоя, стекает, обнажая новые порции шихты. Масса перемешивается благодаря конвекционным потокам. Последние вызываются погружением более тяжелой проварившейся стекломассы и неравномерным прогревом горшка, что обуславливает вытеснение более тяжелой стекломассой стекломассы более легкой.

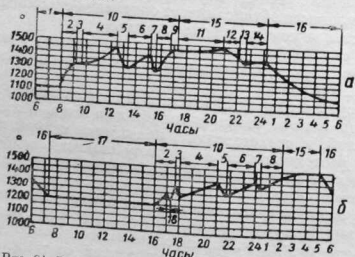


Рис. 91. Режим варки: а — зеркального стекла и б — сортового стекла;

1 — дутье; 2 — разогрев; 3 — первая засыпка; 4 — первый провар; 5 — вторая засыпка; 6 — второй провар; 7 — третья засыпка; 8 — третий провар; 9 — выкип педокон; 10 — варка; 11 — бурение; 12 — доводка; 13 — спуск шихаря; 14 — выдержка; 15 — дегазация; 16 — студка; 17 — выработка; 18 — засыпка боя.

К концу периода провара температура поднимается до максимума (1400—1550°), при котором протекают дегазация и гомогенизация массы.

Нагрев массы в горшке происходит, главным образом, за счет восприятия ее поверхностью тепла излучения газов и кладки. Через стенки горшка передается сравнительно небольшое количество тепла. Только в закрытых горшках все тепло передается через стенки горшка.

По окончании дегазации начинается период студки, и температура снижается до требуемой для выработки. Для этой цели уменьшают подачу топлива и открывают рабочие окна. В период выработки поддерживают более или менее постоянную температуру.

Температура выработки стекломассы зависит от размеров изделий (чем крупнее, тем ниже температура) и вязкости стекломассы. Для зеркального стекла, изготавливаемого методом литья, она составляет примерно 1100°, мелких изделий — 1250° и тугоплавких стекол — 1350—1450°.

Для достижения требуемых температур и уменьшения потерь горение ведут с минимальным (0—20%) избытком воздуха, стараясь избежать неполноты горения.

В случае необходимости в отдельные периоды варки поддерживают окислительный или восстановительный режим. В период выработки необходимо подводить небольшое количество тепла при достаточном заполнении печи газами. Поэтому работают с избытком воздуха до 60%. Вследствие большого избытка воздуха, вводимого для горения, а также присоса воздуха извне через окна и охлаждения кладки, температура по длине факела быстро падает. Для поддержания более равномерной температуры перевод клапанов в регенеративных печах в период выработки производят чаще — через 15—20 мин. вместо 20—30.

Обычная продолжительность полного цикла работы (варка, дегазация, студка, выработка) для сортового стекла при односменной выработке, а также для зеркального стекла, вырабатываемого методом литья, составляет 24 часа. В производствах оптического и тугоплавкого стекла продолжительность полного цикла больше, вследствие более длительной варки.

Устройство

Горшковые печи (рис. 92, см. вклейку) состоят из рабочей камеры 1, в которой располагаются горшки 2, горелок 3, воздухо- и газоподогревательных приспособлений (регенеративных или рекуперативных) 4, каналов 5, клапанов и тигového устройства.

Рабочая камера. Рабочая камера (см. рис. 92) состоит из пода 7, на котором устанавливают горшки, бокового ограждения (ограждение) 8, прорезов («бычков») 9, расположенных на окружке и ограничивающих рабочие окна 10, и свода 11. Для вставки

и выемки горшков в окружке имеется большое отверстие, прикрываемое заслонкой. В горшковых печах зеркального производства против каждого горшка имеются большие отверстия для выемки и вставки горшков.

Под печи обычно выкладывают из крупных шамотных или dinasовых плит толщиной 200—300 мм, а окружку — из шамотного кирпича и снаружи обкладывают изоляционным кирпичом. Толщина окружки 450—500 мм. Простенки и сводные, перекрывающие рабочие окна, выполняют из полукислого кирпича или из dinasа, что предпочтительней. Свод печи выкладывают из dinasа толщиной в один кирпич.

Горшки обычно делают круглой формы и реже овальной. При круглой форме хуже используется площадь пода, но они прочнее овальных. Последние применяют, главным образом, в зеркальном производстве, как более удобные для выемки.

Рабочая камера печи может иметь прямоугольную, овальную или круглую форму, которая определяется формой горшков, размерами печи и способами оттопления. При овальных горшках печи придают прямоугольную форму, что обусловлено размещением горшков и горелок.

Большие печи с горелками в поду делают круглыми и овальными. Круглые печи удобны в смысле размещения мастеров, и распределение газов в них равномернее. Рекуперативные печи обычно круглые. Такая форма при постоянном направлении газов позволяет наиболее равномерно обогреть печь.

Регенераторы или рекуператоры горшковых печей, переводные клапаны и каналы располагают под рабочей камерой.

Движение газов. В горшковых печах возможны нисходящее, восходящее, комбинированное и горизонтальное направления движения газов (рис. 93).

В регенеративных печах применяется комбинированное и горизонтальное направление газов, в рекуперативных — нисходящее, восходящее и комбинированное.

Регенеративные и рекуперативные печи с комбинированным направлением газов, в которых газы движутся сначала вверх, потом вниз, образуя подкову в вертикальной плоскости, называют печами с нижним пламенем. Преимуществами их являются отвод холодных газов с пода печи и равномерный прогрев горшка по высоте. Недостаток этих печей заключается в сильном износе пода и горшков при высоких температурах варки.

Горшковые печи с нижним пламенем применяют, главным образом, при не слишком высоких температурах варки. В случае высоких температур варки их устанавливают только при необходимости поддержать равномерную температуру по высоте горшка.

Печи с нижним пламенем применяют в производстве оптического, высококачественного сортового, электроколбоного сте-

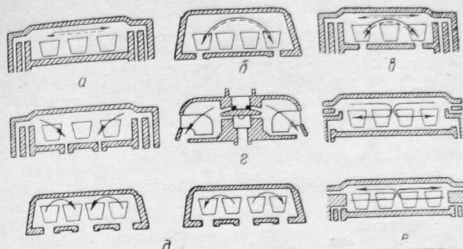


Рис. 93. Направление движения газов в горшковых печах: а — регенеративная печь с верхним пламенем; б — то же с нижним пламенем; в — то же с комбинированным движением газов; г — рекуперативная печь с нижним пламенем; д — то же с нижним пламенем; е — то же с восходящим пламенем.

На рис. 92 представлена восьмьгоршковая печь с нижним пламенем конструкции В. П. Суровцева. Такие печи применяют главным образом в производстве высококачественного сортового стекла.

Регенеративные горшковые печи с горизонтальным направлением движения газов называют печами с верхним пламенем. Преимуществом их является возможность поддерживать очень высокие температуры вследствие предохранения горшков и пода от износа холодными газами, находящимися у пода.

Недостаток этих печей заключается в сильном охлаждении нижней части горшков в период выработки, что при длительной выработке вызывает порчу стекла.

Поэтому печи с верхним пламенем особенно целесообразно применять при высокой температуре варки и непродолжительной выработке. Подобные условия имеют место, например, в производстве зеркального стекла методом литья. Печи с верхним пламенем применяют для варки стекол, требующих высоких температур, как-то: пирекса, оптического стекла и т. д.

На рис. 94 представлена печь с верхним пламенем. Пламя развивается в вынесенной наружу горелке и проходит над горшками. Горшки и под находятся в мешке более холодных и тяжелых газов, ухудшающих передачу тепла, но предохраняющих их от разрушения.

В печах с верхним пламенем нет нагреваемой газовой камеры предварительного сгорания — кармана (коллода) для сбора стекла, вытевшего из горшков, который имеется в печах с нижним пламенем. Стекло выпускают наружу через отверстия в поду или в окружке.

Горелки располагают друг против друга или рядом. В последнем случае путь пламени имеет форму подковы и большую длину.

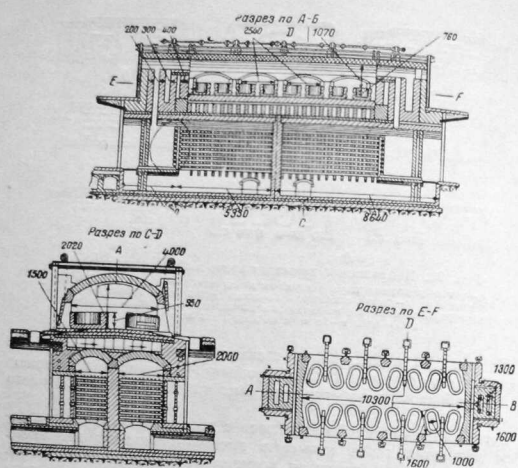


рис. 94. Горшковая печь с верхним пламенем.

Можно совместить верхнее и нижнее пламя газовых ходов для подвода и отвода газов над горшками и на уровне пода. Подобные печи применяют при высокой температуре варки, низкой температуре выработки и большой продолжительности последней.

В регенеративных печах восходящее движение газов нежелательно, так как факел высокой температуры обогревает нижнюю часть горшков, находящуюся в условиях наибольшей нагрузки стекломассы.

В регенеративных печах возможно нисходящее движение газов, поступающих в верхней части печи и отводимых в нижней. В подобных печах по существу имеет место совмещение чисто нисходящего движения с горизонтальным. Горизонтальная ветвь пламени позволяет поддерживать очень высокие температуры без излишнего износа горшков и пода, а нисходящая ветвь дает возможность избежать большого отставания в нагреве нижней части горшков. Подобные печи применяют, в частности, в оптическом производстве (рис. 1).

Горелки. В горшковых печах различают кадьевые, щелевые и шахтные горелки.

Горелки с камерами предварительного сгорания, подводящие газы у пода, называют кадьевыми (рис. 92). При отсут-

ствии предварительного сгорания и подводе газа и воздуха через щели в поду горелки называют щелевыми. В печах с нижним пламенем преимущественно применяют кадьевые горелки.

В печах с верхним пламенем газ и воздух подводят по вертикальным кирпичным каналам, переходящим в горизонтальные. Эти горелки называют шахтными (рис. 94). Обычно горизонтальный канал является камерой предварительного сгорания.

При отсутствии делительного языка происходит сильный удар струй и интенсивное сгорание. Уменьшение предварительного сгорания достигается установкой делительного языка в горизонтальном канале.

Ввиду развития высоких температур, камеры предварительного сгорания выкладывают из динаса, первосортного шамотного или песчано-глинистого материала.

Во избежание расслоения пламени при разгаре кадей скорости в них принимают порядка 12—15 м/сек., считая на сумму объемов газа и воздуха при 1300° и на период варки. В отношении горелок печей с верхним пламенем следует руководствоваться соображениями, изложенными ниже применительно к ванным печами.

Характеристика работы

Характеристика режима температур печей для сортового стекла приведена на рис. 91.

Некоторые данные о размерах и работе горшковых печей приведены в табл. 18.

В табл. 20 приведены тепловые балансы горшковых печей.

5. ВАННЫЕ ПЕЧИ

Режим работы

В ваннных печах периодического действия все стадии процесса стекловарения протекают так же, как и в горшках, т. е. последовательно в одном объеме. Сравнительно большие размеры бассейна для стекловарения несколько усложняют движение стекломассы.

В ваннных печах непрерывного действия отдельные стадии процесса стекловарения протекают в различных частях печи, и в них поддерживается неодинаковая температура (рис. 95). Различают зоны варки, дегазации, стужки и выработки, которые могут быть отделены друг от друга. Сырые материалы и бой могут быть отделены в карман 7 и подвергают постепенному процессу (рис. 99) загрузки в карман 8. Расплава, образующийся на поверхности шихты, стекает, и более проварившаяся, а также охлажденная и дегазированная стекломасса опускается в результате возникновения конвекционных потоков масса опускается сложным путем. Прокипяченная и дегазированная стекломасса поступает в отделенный 9, где охлаждается и выработывается.

Характеристика горшковых печей

Таблица 18

п/п №	Тип печи	Форма печи	Вид продукции	Размеры печи в м			Площадь в м ²		Горшни		Объем пассивной паровой в м ³
				длина	ширина	высота от пола до свода	под	надой	поверхности горшка в м ²	количество горшка в кг	
1	Печь с квадратным	Овальная	Сортавальная посуда	5,9	5,42	1,56	25,3	0,22	12	6,0	5,36
2	То же	То же	То же	5,6	4,8	1,5	20,4	0,31	16	6,9	9,52
3	»	»	»	5,0	4,6	1,24	18,1	0,27	10	5,0	5,42
4	Печь с верхним плавлением	Углубленный эллипс	Химическая посуда	4,5	2,5	1,6	9,5	—	10	3,3	3,20
5	Печь с квадратным	Круглая	Парфюмерная посуда	—	—	1,29	22,9	—	12	—	—
6	То же ²	То же	Сортавальная посуда	—	—	1,40	9,6	0,158	10	3,5	19,00
7	» ³	»	Колбы и трубки	—	—	1,43	8,4	0,09	7	2,24	260
8	» ⁴	Овальная	Сортавальная посуда	5,6	5,1	1,45	22,4	0,436	14	6,5	38,1

¹ Топливо — мазут, в остальных случаях генераторный газ на древесинах и торфах
² Расход воздуха — влажно-сухой дровяной или торфяной дым при испытаниях 2,6—3,1 кг/кг стекломассы.
³ Отношение объема воздуха к объему стекломассы и главного восстановителя составляет 1—1,3.
⁴ Продолжительность полного цикла (зарядка, дегазация, студина, выработка) — 1 сутка.

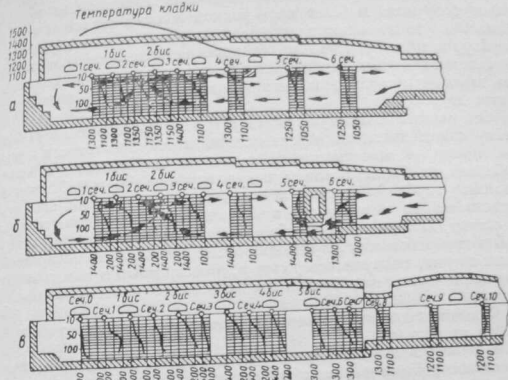


Рис. 95. Распределение температур и движение потоков в продольной плоскости бассейнов ванн печей: а — печь с лодкой; б — печь с протоком; в — печь с перегородкой.

Максимальные температуры поддерживают в зонах варки и дегазации. В конце зоны дегазации температура несколько ниже, ввиду опасности возникновения нежелательных потоков стекломассы. В студинной части температуру снижают.

Местонахождение максимума температур определяется конструкцией печи и допустимой интенсивностью студки стекломассы. Оно также выбирается с расчетом, чтобы создать температурную преграду для непроваренной стекломассы, так как потоки стекломассы движутся во все стороны от места нахождения максимума температур, и интенсивность их определяется градиентом температур.

В ваннах печах непрерывного действия побудителями движения стекломассы из одной части в другую являются разница в удельных весах различно нагретой и проваренной стекломассы и отбор стекломассы.

В зависимости от направления различают поперечные и продольные потоки, двигающиеся на различной глубине. Потоки замкнуты в циклы, от которых ответвляется выработочный поток. Направление движения потоков зависит от режима температур газовой среды и до известной степени от положения вводимых в стекломассу дополнительных приспособлений (см. рис. 90, 95).

В области загрузки шихты движение стекломассы обусловлено погружением более проваренной и тяжелой стекломассы. Несколько далее области загрузки из участка максимума температур к торцевой стене по оси печи направляется поверхностный поток стекломассы; возвратная ветвь этого потока движется на некоторой глубине по направлению к участку максимума температур.

От участка максимума температур к выработочному бассейну также движется поверхностный поток стекломассы, опускающийся, в зависимости от характера делительных приспособлений, на большую или меньшую глубину. Из выработочного бассейна глубинный поток возвращается в варочный бассейн, поднимаясь на поверхность в области максимума температур. К потоку, движущемуся из области максимума температур к выработочному бассейну, присоединяются часть массы возвратной ветви потока, движущегося у сыпки, и возвратный поток из выработочной части, поднимающийся в области максимума температур.

Сужение проходных отверстий уменьшает количество движущейся стекломассы.

В поперечном направлении бассейна более холодная и, следовательно, более тяжелая стекломасса, находящаяся у стен, выдавливает более горячую к середине бассейна; поэтому потоки на поверхности обычно направлены к стенкам и на глубине — от стен к середине.

В верхнем слое стекломассы, сильнее нагретом, более теплопроводим и подвижном, в наибольшей степени проявляется влияние возникающих сил.

Вследствие разрушающего действия на стены бассейна нежелательны поперечные потоки и усиленные продольные потоки, направленные к сыпке. В области струйки усиленные потоки нежелательны вследствие слишком большой вязкости стекломассы, препятствующей взаимному растворению разнородных струй. Увеличение потоков, направленных от местоположения во избежание увлечения плохо проваренной массы. Кроме того, эти потоки определяют один из недостатков современных печей, в которых необходимо нагревать и охлаждать стекломассу в количестве, значительно превышающем вырабатываемое.

Отбор на глубине обеспечивает поступление в выработочную часть более тяжелой охлажденной стекломассы и препятствует вовлечению плавающих на поверхности загрязнений. Наиболее резко такой отбор выражен в печах с протоком — узким каналом для глубинного отбора потока проваренной стекломассы. Эти шихт участки зеркала. Для листового и зеркального стекла такие печи менее пригодны, так как в силу слоистого характера движения стекломассы перед протоком, в протоке и за ним, сбли-

жаются плохоперемешивающиеся слои с неодинаковыми свойствами. Поэтому для листового и зеркального стекла, вырабатываемого в виде ленты значительной ширины, применяются печи с перегородками-лодками (см. рис. 95, верхний).

Передача тепла от газов и кладки стекломассе и шихте происходит через верхнюю поверхность. Распределение температур по длине газовой среды ванной печи непрерывного действия подерживают в соответствии с заданным режимом. В поперечном направлении значительное изменение температуры нежелательно, во избежание усиления конвекционных потоков и неравномерного нагрева стекломассы.

Распределение температур по длине ванной печи соответствует изменению во времени температур в горшковой печи.

Горение в пламенном пространстве ванной печи ведут с малым избытком воздуха. В продуктах горения горючие составные части отсутствуют или содержатся в незначительных количествах. Условия меняются только при необходимости в окислительной или восстановительной газовой среде. К удаляемому дымовым газам через неплотности кладки и клапанов присасывается воздух, отчего увеличивается содержание в них кислорода.

Как для ванн, так и для горшковых печей предпочитают применять светящиеся пламя в целях удобства регулирования температуры, лучшего обогрева загружаемых материалов и понижения температуры отходящих газов.

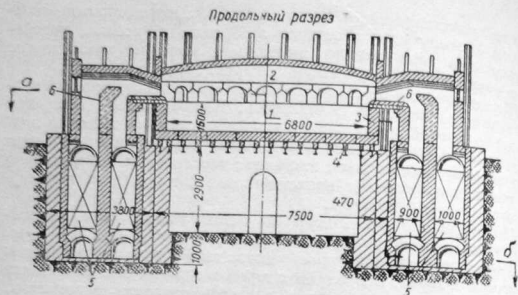
Во избежание выбивания газов и присоса воздуха и в целях создания окислительной атмосферы на поверхности стекломассы, давление в рабочей камере на уровне окон обычно поддерживают близким к нулю. В некоторых случаях, например, при работе на сульфатной шихте, для создания восстановительной атмосферы на поверхности стекломассы, на уровне зеркала стекла поддерживают положительное давление.

Иногда давление увеличивают или уменьшают для создания соответствующего газового или температурного режима в неотщипываемых частях печи.

Схема распределения температур и давлений в стекловаренной печи дана на рис. 87.

Устройство

Рабочая камера. Рабочая камера ванн печей состоит из бассейна-ванны со стекломассой и газового пространства. Ванные печи периодического действия (рис. 96) не имеют разделительных приспособлений в области стекломассы и представляют собой как бы большой горшок. В печах непрерывного действия для выделения отдельных зон (обычно зон варки и выработки) в различном режиме в бассейн вводит разделительные приспособления (рис. 97) из огнеупорных материалов: лодки (погружаемые в стекломассу перегородки), краны (цилиндры) и боты



План (по од)

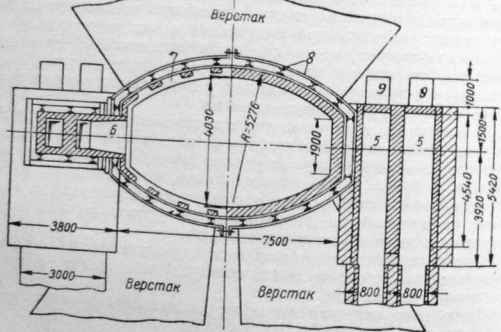


Рис. 96. Ванная печь периодического действия:

1—бассейн; 2—газовое пространство; 3—стены бассейна; 4—дно бассейна; 5—регуляторы и каналы под ними; 6—горелки.

сосуды, открытые снизу и сообщаемые с рабочим окном) или же охлаждаемые водой трубы.

Бассейну печи можно придать форму, обеспечивающую выделение этих зон без помощи временных разделительных приспособлений. Для этой цели варочную и выработочную части выполняют в виде самостоятельных бассейнов, соединяемых каналом (печи с протоком, рис. 97—99). Можно также разделить бассейны с помощью промежуточных стенок, обычно охлаждаемых водой.

Введение лодок и других разделительных приспособлений, а также применение протоков позволяет отбывать на глубине лучше проваренную и охлажденную стекломассу.

Обычно зоны собственно варки и дегазации, вследствие трудности их разделения при высоких температурах, пространственно не разделяют и в совокупности называют «варочной частью». Часто также не разделяют ступочную и выработочную части.

Бассейн ванной печи состоит из стен и дна. Газовое пространство ограничивается стенами и сводами.

В печах периодического действия (см. рис. 96) газовое пространство представляет собой одну общую полость. В старых ваннах печах непрерывного действия также имелась одна общая полость, и тепловой режим изменяли, регулируя работу горелок или обогревая только одну часть печи.

В современных ваннах печах непрерывного действия для улучшения возможностей регулирования режима газовое пространство разделяют с помощью сплошных или решетчатых перегородок (экранов) и либеров.

Ванная печь непрерывного действия с протоком и разделенными бассейнами и газовыми пространствами (рис. 98) была изобретена Малышевым в 1897 г. Обе части этой печи имеют самостоятельное отопление. Полное разделение печи позволяет легко регулировать режим, но увеличивает потери тепла в окружающую среду.

Несколько видоизмененные печи Малышева получили широкое распространение в СССР и за границей. Особенно распространены такие ваннальные печи непрерывного действия с экраном, в которых газовое пространство разделено решетчатым экраном (рис. 99). Для облегчения доступа к протоку и устранения мертвых слоев стекломассы сжимают стены печи у протока. С целью уменьшения износа кладки проток снабжают хорошим воздушным или водяным охлаждением. Такая конструкция печи дешева, экономична и позволяет избежать необходимости самостоятель-

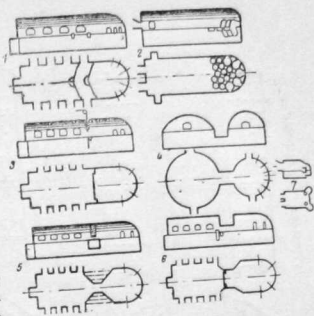


Рис. 97. Разделение зон стекломассы и газового пространства в ваннах печах: 1—печь с мелко погруженными долами; 2—печь с ботами и экранами; 3—печь с грубопогруженной лодкой и подъемными либеров в газовом пространстве; 4—печь с протоком и разделными газовыми пространствами; 5—печь с протоком и экраном; 6—печь с либером; 7—печь с протоком регулируемой высотой.

Рисунок на вращающемся валу

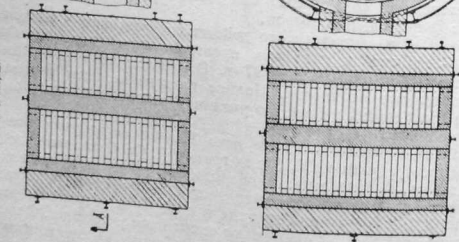


Рисунок на вращающемся валу

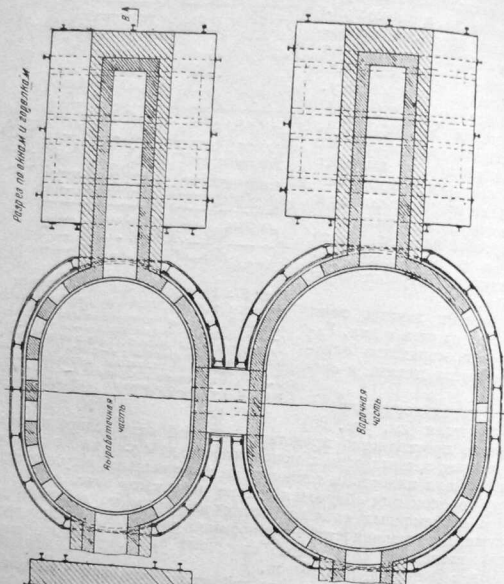


Рисунок на А В

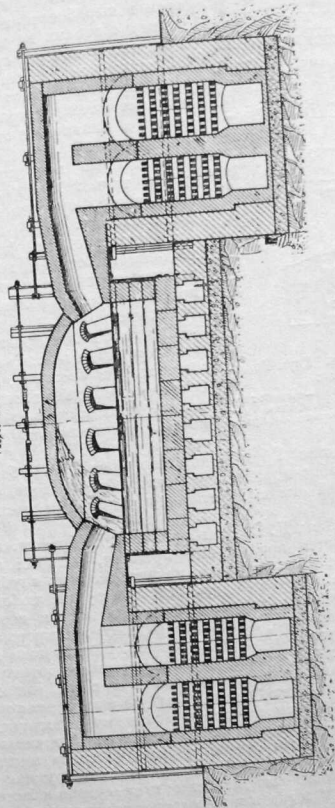


Рис. 98. Печь Магнатова

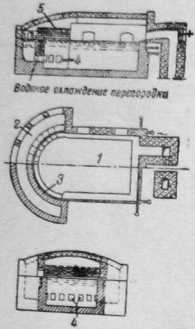


Рис. 100. Печь Грум-Гржимайло:
1—варочная часть; 2—выработочная часть; 3—перегородка; 4—протоки; 5—решетчатая ширма.

ного отпления выработочной части. Требуемое количество тепла передается в выработочную часть излучением и с газами из варочной части. Разделение газовой среды позволяет с легкостью регулировать режим каждой части печи: поддерживать высокие температуры в варочной части и низкие — в студочной и выработочной.

Подобные печи применяют для варки тарного, сортового, электродного, трубчатого и других видов стекла.

Вследствие резкого фиксированного глубинного отбора хорошо проваренного потока стекломассы, печи с протоком имеют большую производительность.

В печах малых размеров применению протока в виде канала, соединяющего два бассейна, препятствует большая требуемая площадь. В СССР разработано несколько конструкций печей, устраняющих это неудобство.

В конструкции Грум-Гржимайло (рис. 100) бассейны для варки и выработки разделены охлаждаемой водой перегородкой. В нижней части перегородки находится несколько протоков.

В конструкциях Д. Б. Гинзбурга и В. П. Суровцева (рис. 101) проток образуется лодкой или кранцем, который зажимается сверху и может быть погружен на желательную глубину. Такое устройство позволяет отбирать стекломассу на любой глубине, а также сменить на ходу замыкающую проток керамическую деталь и избежать искусственного охлаждения протока, необходимого при других устройствах. На рис. 101 показана печь Гинзбурга и Суровцева со сменным регулируемым протоком.

Для листового стекла применяют печи, в которых зоны варки и дегазации в области стекломассы не имеют резкого разделения. В основном распространены советские конструкции печей, в частности с пережимом С. С. Бермана. Отличительной особенностью ее является резкое сужение бассейна между зонами варки и студки. В настоящее время эта конструкция дополнительно усовершенствована, а именно: после сужения бассейн вновь расширяется и в газовом пространстве устанавливается плоский экран из охлаждаемых водой фасонных шамотных брусков, подвешенных на балках (рис. 102).

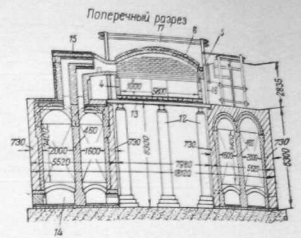
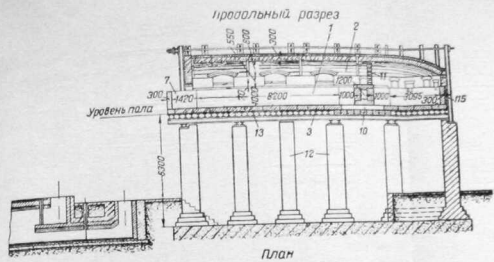
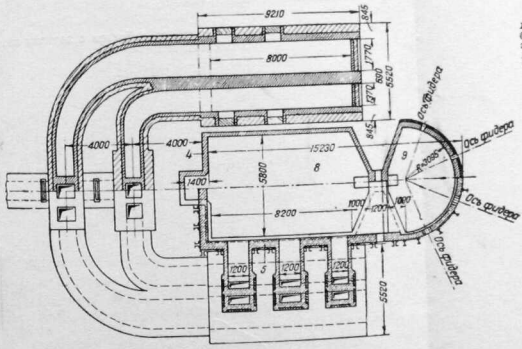


Рис. 99. Печь с протоком:
1—бассейн; 2—газовое пространство; 3—дно бассейна; 4—стены бассейна; 5—стены газового пространства; 6—шва; 7—загрузочный нарам; 8—варочный бассейн; 9—выработочный бассейн; 10—проток; 11—решетчатая ширма; 12—опорные колонны; 13—опорные балки; 14—каналы под регенераторы; 15—горелки; 16—стойки обмуровки; 17—сама печь.



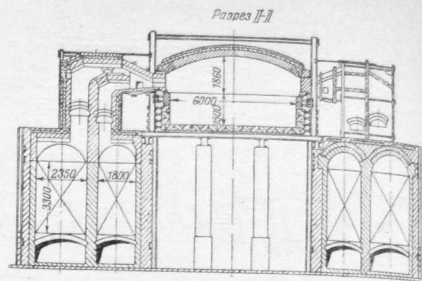
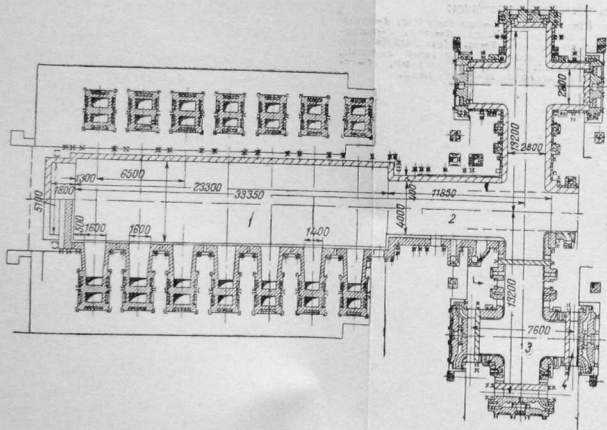
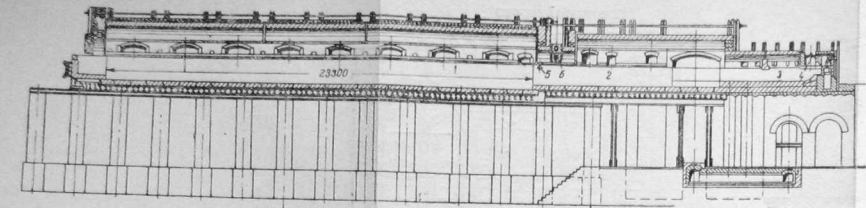


Рис. 102. Ванная печь непрерывного действия с лодками или холодильниками.

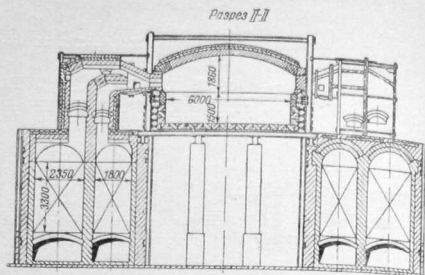
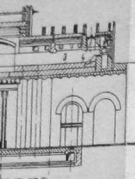


Рис. 102. Ванная печь непрерывного действия с лоднами или холодильниками.

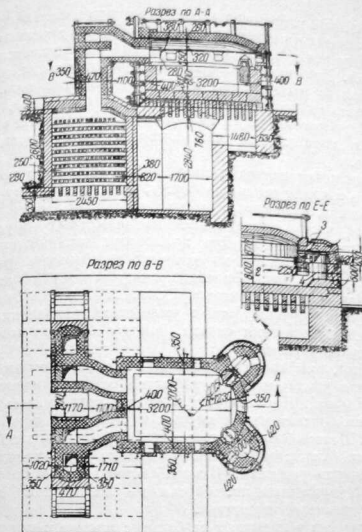


Рис. 101. Печь Гинзбурга и Суровцева с регулируемым протоком:
1—проток; 2—варочная часть; 3—кранец, замыкающий проток; 4—выработочная часть.

Разделение стекломассы осуществляется с помощью шамотных поплавок-додок или охлаждаемых водой труб.

На рис. 102 представлена печь для листового стекла, в которой получают достаточно гомогенную стекломассу вследствие движения последней широким потоком. Варочная часть 1 отделена от студочной 2 с помощью охлаждаемой водой трубы 5 и экрана 6. Студочная часть печи переходит в машинный канал 3 для выработки стекла машинами из подмашинных камер 4.

Обычно такие печи имеют большие размеры и снабжены многочисленными горелками.

Бассейн ванной печи в части для варки — варочный бассейн — обычно имеет в плане прямоугольную форму. Для загрузки шихты часто устраивают выступающие карманы. В местах перехода одной части печи в другую бассейн сужается постепенно

ли резко. Для устранения «мертвых» углов и большей доступности переходных участков сужение делают постепенным.

Конфигурация выработочной части определенным образом. При ручной выработке прямоугольная или трапециевидная (с расширением в сторону рабочих окон) выработочная часть на конце имеет полукруглое очертание, допускающее удобную расстановку рабочих окон. При механизированной выработке выработочная часть иногда имеет прямоугольное очертание.

Ванным печам периодического действия, кроме прямоугольной, часто придают овальную форму, учитывая форму развивающегося факела, размещение рабочих окон и др.

Бассейн часто выкладывают из шамотных брусьев. Для уменьшения износа бассейна применяют высокоглиноземистые огнеупорные материалы, из которых наибольшее распространение получил муллит. Разъедание брусьев в наибольшей мере проявляется в швах и поэтому следует применять возможно более крупные брусья. Чтобы уменьшить разъедание в швах и избежать загрязнения стекла, кладку брусьев ванной печи ведут насухо, впритир.

Бассейны, как правило, снабжают искусственным охлаждением и для увеличения его эффективности применяют тонкие брусья (300 мм). На заводах СССР еще сохранилась практика применения брусьев малой высоты и смены их при «горячих» ремонтах. Целесообразнее применять брусья большой высоты, хорошо их охлаждать и сменять только при холодных, или «подуходных» ремонтах. В выработочной части бассейна, где разъедание незначительно, брусья не охлаждают и бассейн снабжают тепловой изоляцией.

Дно бассейна укладывают на балки с прокладками из полосового железа (рис. 60).

Бассейн располагают на отдельном фундаменте и реже — на нижнем строении печи. Стены бассейна, испытывающие гидростатическое давление стекломассы, обвязывают специальными металлическими креплениями (рис. 60).

Газовое пространство по очертанию в плане соответствует бассейну. В стенах газового пространства предусматривают отверстия для обслуживания, выработки стекла, подвода и отвода газов.

В современных больших печах стены и свод подвешивают самостоятельно, что дает возможность независимо ремонтировать отдельные части, в основном бассейн, подвергающийся наибольшему износу. Вследствие незначительного разъедания, стены выработочной части иногда не подвешивают.

Стены выкладывают из крупных фасонных брусьев на тонком шве и обычно подвешивают на металлических опорах.

Свод печи, подвергающийся действию очень высоких температур, выкладывают из крупных дивановых кирпичей. Он состоит

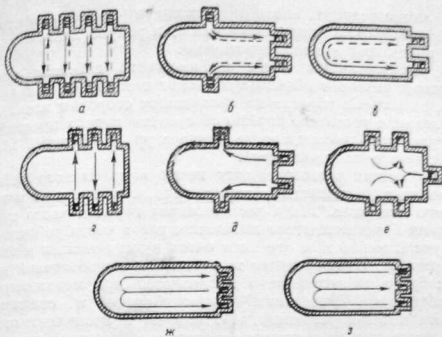


Рис. 103. Направление движения газов в ванньных печах:

а — регенеративная печь с поперечными пламенем; б-г — же с продольными пламенем; д-е — же с подковообразным пламенем; ж — регенеративная печь с поперечным пламенем; з — же с продольным пламенем; е — то же с комбинированным пламенем; ж, з — то же с подковообразным пламенем.

из нескольких секций. Каждая секция длиной 3—6 м отделена от соседней температурным швом и снабжена самостоятельной обвязкой, допускающей регулирование при пуске и остановке печи. Свод лежит на металлической опоре (рис. 60).

Иногда применяют своды из самостоятельной подвешенных элементов, что позволяет заменять на ходу изношенные части, полное разделить отдельные части газового пространства, снизить свод над стекломассой, т. е. уменьшить поверхность охлаждения и потери в окружающую среду и строить печи любой ширины.

Такие элементы преимущественно применяют для разделения отдельных частей печи (рис. 102).

Для восприятия распора свода печь снабжают обвязкой. Стойки печи, являющиеся элементом обвязки, используют и для подвески стен печи и восприятия распора бассейна (рис. 60).

Движение газов. В ванньных печах различают продольное, поперечное, подковообразное и комбинированное направления движения газов (рис. 103). Эти направления определяются по отношению к направлению движения стекломассы. Поперечное направление газов понимается как перпендикулярное производственному потоку стекломассы, а продольное — как параллельное или совпадающее с ним.

В регенеративных печах применяют в основном поперечное и подковообразное направление газов, в рекуперативных, кроме того, продольное и комбинированное.

В регенеративных печах непрерывного действия средних и больших размеров обычно применяют поперечное направление газов, располагая горелки по продольным сторонам печи. Такое расположение позволяет хорошо обогреть печное пространство и регулировать распределение температур и давлений и газовую атмосферу по длине печи.

В небольших регенеративных печах непрерывного действия горелки часто располагают с торцов печи, и газы имеют подковообразное движение. Такое расположение горелок часто требует установки ботов вследствие выбивания газов через рабочие окна при ручной выработке. Эти печи очень чувствительны к изменениям режима, отражающемся на состоянии выработочной части, что особенно неблагоприятно проявляется при механизированной выработке. Разделение газовой среды и стекломассы смягчает и даже устраняет этот недочет и позволяет строить печи значительных размеров с подковообразным движением газов.

Преимуществами печей с подковообразным движением газов являются: удлинение пути газов, позволяющее более полно провести процесс горения в небольших печах, хороший обогрев стекломассы, труднее осуществимый в малых печах с поперечным направлением газов, и большая доступность печи для обслуживания с боковых сторон.

Рекуперативные ванные печи вообще имеют небольшие размеры. Подковообразное направление газов в них используют наряду с продольным направлением. Иногда применяют печи с комбинированным движением газов, — поперечным и продольным. Поперечное направление газов в них редко применяется в силу несимметричности газового потока.

Приспособления для загрузки шихты. В ваньных печах периодического действия засыпка шихты производится, как и в горшковых печах, при помощи ковша или лотка через отверстия вблизи горелок.

В ваньных печах непрерывного действия шихту обычно загружают в начале варочной части у торцовой стены для того, чтобы путь до зоны дегазации был максимальный. В печах с подковообразным пламенем, при отсутствии места для расположения отверстия и площадки между горелками, загрузка производится с продольных сторон печи.

Иногда загрузку производят ковшом непосредственно в печь (рис. 104-в). Обычно ковш подвешивают на роликах,двигающихся по монорельсу, и поворачивают в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Засыпку ведут преимущественно у подающей горелки. Распределение шихты производится гребком через засыпное отверстие и отверстия над бассейном.

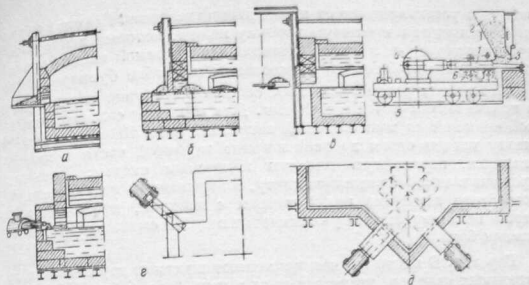


Рис. 104. Загрузочные приспособления ваньных печей:

а — дотном; б — через карман; в — ковшом; д — шнеком в фриттвалую камеру; е — мелконулевая загрузка толкателем (тонким шунтиром поназано движение шихты при работе одного толкателя, жирным шунтиром — при их совместной работе); ж — загрузка по всей ширине зеркала; 1 — толкатели; 2 — бункер для шихты; 3 — затвор бункера; 4 — механизм толкателя; 5 — тележка; 6 — ролики.

В больших печах для засыпки шихты часто делают сыпчоные карманы (рис. 104-б), представляющие собой выступ бассейна без перекрытия. В нижней части кармана находится расплавленная стекломасса, на которую вручную или механически засыпают шихту и бой. Засыпанная масса гребками проталкивается в печь.

В случае падения шихты с высоты уменьшение пыления достигается устройством камер спекания — карманов (рис. 104-г), в которых имеется газовое пространство, перекрытое сводом и сообщающееся с газовым пространством варочной части. Камеры обогреваются за счет отдачи тепла из варочного бассейна, и шихта в них спекается. Пыление можно уменьшить, если подкашивать газы из печи в камеру и удалять из нее пыль при помощи вытяжного устройства.

Нераспадающиеся брикеты можно подавать непосредственно в печь, так как не происходит уноса шихты, разведения кладки и засорения регенераторов или рекуператоров.

Подачу шихты в карман или камеру спекания легко механизировать, расположив над ними бункеры для шихты и боя. Шихту и бой подают в бункеры транспортными приспособлениями, а выгружают при помощи затворов или питателей. Можно подавать шихту в карман непосредственно из вагонеток, подвешенных по подвесному пути.

Механизация загрузки печи и ее регулирование достигаются при помощи винтов-шнеков, толкателей, вибрационных плит и дру- пластин, имеющих поступательно-возвратное движение, и других приспособлений. Шнеки заключают в охлаждаемый водой

кожу и устанавливают на передвижной тележке. Шихта из бункера попадает в приемную воронку шнека, который непрерывно регулирует шибром на питательном патрубке бункера.

Недостаток рассматриваемых способов загрузки заключается в подаче шихты кучей и пылении. Для загрузки сплошной пещи применяется тонкослойный загрузчик (рис. 104-е). Он подает шихту тонким слоем по всей ширине варочной части в камеру спекания, перекрытую плоским подвесным сводом. Питатель представляет собой стальную плиту, совершающую поступательное движение под бункером с шихтой, которая высыпается на плиту. Шихта увлажняется водой и смешивается с дробиным боем.

Горелки. В ваннах печах применяют шахтные горелки в виде отдельных каналов,водящих газы в печь (рис. 99 и 102).

Шахтные горелки похожи на горелки горшковых печей с верхним пламенем. Чтобы направить газы на стекломассу горелкам придается уклон. Обычно свод горелки вводится в печь самостоятельной аркой (рис. 102). В отдельных конструкциях (рис. 99) свод горелки сопрягается со сводом печи, что позволяет понизить свод.

Работу горелок регулируют с помощью шамотных шибров. Лучшее результаты дает устройство у горелок самостоятельных регенераторов.

Материалом для кладки горелок ваннах печей служит преимущественно высококачественный диноп.

Достаточно надежных данных для полного расчета горелок с предварительным частичным сгоранием нет. Некоторые практические данные приводятся ниже.

Угол встречи струй газа и воздуха принимается равным 15—25°, скорость газов, поступающих в камеру сгорания, 4—7 м/сек (увеличение скорости улучшает смешение); расстояние от места начала смешения газа и воздуха до влета 1200—1500 мм.

Угол наклона к зеркалу стекломассы поступающей в печь струи газом должен составлять 20—25°.

Если учесть, что с увеличением длины факела в печи конструкции горелки предусматривается уменьшение предварительного сгорания и что скорость газом во влете должна расти с длиной их пути l м, то для определения выходной скорости w м/сек можно воспользоваться выражением:

$$w = 4 + l \text{ м/сек.} \quad (1)$$

Вообще же для характеристики дальности струи могут быть использованы формулы главы II (табл. 3).

Электрический обогрев печей

В стекольной промышленности используют электрическую энергию в производстве кварцевого стекла, где требуются очень высокие температуры, на заводах, расположенных в местностях с дешевой электроэнергией, и наконец, в качестве дополнительного источника тепла в пламенных печах. Применяют печи косвенного и прямого нагрева (рис. 2).

Преимущества электрических печей заключаются в легкости регулирования и автоматизации режима, возможности концентрации тепла или равномерного распределения его по всему объему, простоте устройства, отсутствии некоторых потерь (с отходящими газами, от неполноты сгорания) и сведения остальных к минимуму. В электрических печах нагрев можно производить в атмосфере любого газа.

В настоящее время дуговые печи утратили свое значение. Электрические печи различных типов, за исключением печей прямого сопротивления, применяются в производстве кварцевого стекла. В производствах листового и тарного стекла применяют печи прямого сопротивления.

Электрические печи прямого сопротивления для варки стекла представляют собой ванны печи, в которых помещены электроды из чистого железа, специальных сплавов или графита. Электроды охлаждаются водой. Бассейны разделены перегородками на варочную и выработочную части.

Имеется многолетний опыт эксплуатации печей прямого сопротивления в Ереване, усовершенствованных советскими инженерами М. А. Бабаджаян, В. С. Минасяном и Ф. С. Энтелисом.

На рис. 105 представлена электрическая печь прямого сопротивления для выработки листового стекла. Печь имеет форму трехлучевой звезды. Отдельные лучи сопряжены один с другим под углом 120°. Два «варочных» луча снабжены в торцовых подступенках форсунками и работают параллельно. Форсунки используются для разогрева печи. В участке, в котором сопрягаются лучи (трехфазный центр), завершаются реакции силикатообразования. Дегазация, студка и выработка происходят в третьем луче, оборудованном холодильными карманами и подмашинной камерой.

Стальные полые электроды, охлаждаемые воздухом, расположены в стенах ванны. Нагретый воздух с температурой 70° используется для целей отопления.

Глубина бассейна неодинакова. Наименьшую глубину — 550 мм имеет область дегазации, где требуется развить максимальные температуры.

Ванна, за исключением дна машинного канала, выложена из мулитового огнеупора. Свод печи снабжен тепловой изоляцией. Машинный канал оборудован электрическим подогревателем из

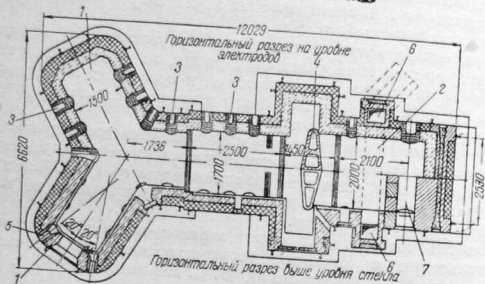
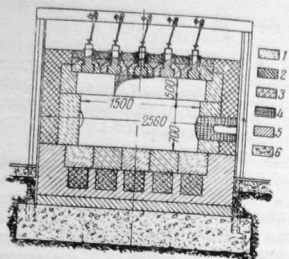


Рис. 105. Электрическая трехфазная печь для листового стекла:
1—варочие лучи; 2—выработочный луч; 3—электроды, охлаждаемые воздухом; 4—отверстия для форсунок; 5—каналы для отвода дымовых газов; 7—подмашинная камера.

угольных электродов и криптоловой массы, засыпанной в полости стен машинного канала.

Мощность электрического трансформатора 1000 ква. Напряжение трансформируется с 6600 в на 127 в.

Расчетный тепловой баланс печи: затрата тепла на варку—46,2%, потери в окружающую среду—28,5% и с нагретым воздухом—25,3%. Часть тепла нагрева воздуха используется. Получается стекло, лишенное полостей.

В последние годы успешно используют электрический подогрев машинных каналов в производстве листового стекла. Такой легкий и быстро регулируемый подогрев позволяет устранить кристаллизацию стекла, наблюдающуюся в условиях пониженного температурного режима.

В ваннах печах с успехом используют электрический подогрев в дополнение к газовому. При сульфатной шихте в вароч-

ной части печи часто наблюдается повышенная вязкость стекломассы, вызывающая замедленное движение шихты. Электрический подогрев стекломассы на глубине позволяет избежать этого недостатка.

При невысоком качестве топлива в зоне дегазации трудно получить достаточно высокие температуры. В то же время расход тепла в зоне дегазации невелик. В этих случаях предлагается применять дополнительно к газовому электрический обогрев в зоне дегазации, что позволяет в достаточной степени поднять температуру стекломассы.

Характеристика работы

Режим температур в печах для листового стекла характеризуется кривыми рис. 95. Некоторые данные о размерах ванншей приведены в табл. 19.

В табл. 20 приведены тепловые балансы ванншей печей.

Таблица 19

Характеристика ванншей печей для листового и зеленого стекла

№ п/п	Вид продукции	Тип печей	Размеры печи				Общая	
			Варочная часть		Студочная и выработочная часть		площадь (в м²)	ширина (в м)
			площадь (в м²)	глубина (в м)	площадь (в м²)	глубина (в м)		
1	Листовое стекло	С слодкато же	94,4	1,5	51,4	1,2	145,8	6
2	То же (для триплекса)	»	132,0	1,5	43,0	1,2	175,0	6
3	Листовое стекло (утолщенное)	»	114,0	1,5	66,0	1,2	180,0	6
4	Листовое стекло	»	128,0	1,5	40,0	1,5	168,0	6
5	То же	»	106,0	1,5	62,0	1,5	168,0	6
6	Зеленая бутылка	С протоктом	67,6	0,9	18,0	0,6	85,6	6
7	То же	То же	68,3	1,2	26,5	1,2	94,8	6
8	То же	»	67,3	1,2	20,4	1,2	87,7	6
9	То же	»	67,0	1,2	27,1	1,2	94,1	6
10	Полубелая бутылка	»	47,0	1,2	14,0	1,2	61,0	6
11	То же	»	62,7	1,2	26,1	1,2	88,8	6
12	То же	»	52,0	1,0	17,0	1,0	69,0	5,2
13	Сортовое стекло	»	18,0	1,0	15,0	1,0	33,0	4

6. ОСНОВЫ РАСЧЕТА ПЕЧЕЙ

Расчет стекловаренной печи состоит в определении размеров рабочей камеры, расхода топлива, размеров вспомогательных

частей печи (каналов, клапанов, горелок, приспособлений для использования тепла отходящих газов, дымовой трубы) и подачи энергии в печь требуемых количеств воздуха и горячего газа и отвода отходящих газов, а также установления характеристик энергетического оборудования, определяют сопротивление пути газов и геометрический напор печи.

Ниже рассмотрены определение размеров рабочей камеры и расхода топлива, как имеющие специфическое значение. Остальные расчеты приведены в соответствующих главах. Данные для определения размеров горелок стекловаренных печей приведены в настоящей главе.

Обычно при проектировании стекловаренной печи бывают заданы производительность печи, вид применяемого топлива и условия работы. В зависимости от свойств стекломассы и условия выработки выбирается тип печи. Производится расчет горелки печи. Обычно в ваннах печах непрерывного действия избыток воздуха принимается равным 10—20%. В печах периодического действия в периоды варки и дегазации избыток воздуха составляет 0—15% и в периоды стужки и выработки воздуха составляет 40—60%. При высоких температурах выработки принимается меньший избыток воздуха.

Определение размеров рабочей камеры горшковых печей

Емкость горшка и его размеры зависят от условий выработки. Горшки должны иметь высоту, удобную для набора стекла. Емкость горшка должна дать возможность выработать всю полезную массу за рабочую смену или же соответствовать порции стекла, требуемой для отливки или для обработки. Толщина стен и дна горшка должна быть такова, чтобы горшок при высоких температурах выдерживал гидростатическое давление стекломассы.

Размеры горшка должны также благоприятствовать прогреву шихты и стекломассы. Чем больше его горизонтальное сечение, тем больше теплоемкость и поверхность поверхности шихты и стекломассы. Чем ниже горшок, тем равномернее распределение температуры по высоте горшка и легче прогрев стекломассы, находящейся у дна. Роль боковой поверхности горшка, как поверхности нагрева, сравнительно невелика. Однако с увеличением высоты горшка возрастает количество стекломассы, проваривающейся на одной и той же площади пода. Для выбора размеров горшка, удовлетворяющих указанным выше условиям, имеется достаточно практических данных. При определении размеров рабочей камеры горшковых печей следовало бы определить размеры горшка, необходимые для возможности восприятия требуе-

емого для варки количества топлива и освоения этого тепла в слое шихты и стекломассы. Применительно к горшковым печам подобная методика расчета не разработана ввиду сложности условий варки и значительного отклонения формы слоя шихты в горшке от правильной геометрической.

Кроме того, ввиду меньшего, сравнительно с ванными печами, значения горшковых печей разработке методики их расчета до сих пор не было уделено достаточного внимания.

В зависимости от выбранной емкости горшка определяют число горшков.

Размеры пода печи принимают минимально необходимые для расстановки горшков, вставки и выемки их, а также для развития факела пламени.

В круглой печи с кадьявыми горелками площадь пода определяется условиями расстановки горшков. Кадю располагают на свободной площади в середине печи, которую также используют при вставке и выемке горшков.

Минимальный диаметр такой печи D_m в плоскости верхнего уровня окружки определяют из выражения:

$$\pi D = d(n + \pi) + 0,05(n + 2\pi), \quad (2)$$

где: d — диаметр горшка в м;

n — число горшков;

0,05 м — расстояние между горшками и между горшками и окружкой.

Аналогично определяют размеры пода в печах иной формы, принимая расстояние между горшками и горелками не менее 250—300 мм, во избежание быстрого износа горшков и для возможности выемки и вставки горшков.

В печах с верхним пламенем необходимо предусмотреть некоторое расстояние между горелкой и горшками во избежание «отставания» нагрева крайних горшков, обусловленного обогревом недостаточно развитым факелом, а также относительно большими потерями тепла ввиду расположения горшков одно временно вблизи горелки и боковой ограничивающих печь стен. При ручной выработке диаметр пода может быть определен с учетом уклона окружки 85°. При механизированной выработке уклона окружки не предусматривают.

Высота окружки соответствует полной высоте горшка, если преобладает уклон пода от центра к периферии, составляющий 25—30 мм/м. Эта высота обычно равняется 500—700 мм. Во избежание ожога при наборе стекла, прорезки между окнами (бычки) выполняют с наклоном внутрь печи под углом, примерно, в 70°. Высота рабочих окон составляет обычно 300—450 мм. Подъем свода определяется из условий достаточной прочности и составляет $1/8$ — $1/10$ пролета.

В горшковых печах с верхним пламенем высота печи определяется положением горелок, располагающихся выше горшков.

Тепловые балансы стекло-

№ п/п.	Топливо	Тип печи	Съем стекломассы (в кг/м ² сутки)	Вид продукции	Приход в %	
					Потенциальное тепло	
					по варочной части	топлива
1	Генераторный газ из очень сырой древесины	Ванная печь больших размеров с лодками (перед ремонтом)	810	Листовое стекло	91,8 ¹	2,2
2	То же	То же	810	То же	53,7	1,3
3	Мааут	Ванная печь средних размеров с протоком	496	Электроколочное стекло (ручная выработка)	97,3	0,1
4	Природный газ	Ванная печь больших размеров с протоком	980	Электроколочное стекло (выработка на машинах)	99,6	—
5	Ноксовальный газ	Ванная печь больших размеров с лодками	—	Листовое стекло	74,1	0,3
6	Генераторный газ из древесины	12-горшковая печь с кадиями	—	Сортовое стекло	90,9	—
7	Генераторный газ из смеси торфа и древесины	4-горшковая печь с верхним пламенем и площадью пода 4,2 м ²	За 15 часов варки сварено и дегазировано 640 кг стекломассы	Специальное техническое стекло	97,1	—

1. Потенциальное тепло смолы 11,7%.
2. Температура стекломассы 1100°.
3. С охлаждающей водой 7,3%.
4. С продуктами дегазации 0,13%.
5. Потери сводом 9,8%; дном — 10,0%; стенами бассейна варочной части проток — 0,8% и стены бассейна — 5,4%.
6. Регенераторами воспринято 55,5% и отдано воздуху 46,6%.
7. Неполнота горения 3,0%.
8. Неполнота горения 3,4%.
9. Потери в газогенераторе и клапанах 15% количества введенно

варенных печей

Тепло нагрева					Расход в %			Примечания
					на стекловарение	в окружающую среду	с отходящими газами	
топлива	воздуха	шхиты	пара	топлива	воздуха	шхиты	пара	
6,0	—	—	—	14,3 ²	57,2 ²	28,5 ⁴		Баланс отнесен к клапанам. Удельный расход тепла в древесине—3820 кал/кг; во всем тепле газа и смол—3170 кал/кг
26,0	19,0	—	—	9,8	22,8	67,4		Баланс отнесен к пламенному пространству
0,3	1,4	0,2	0,7	12,3	69,8	17,9		Баланс отнесен к клапанам. Удельный расх. тепла в топливе—4100кал/кг
—	0,4	—	—	19,1	62,6 ⁵	18,3 ⁴		Баланс отнесен к клапанам. Удельный расход тепла—2080 кал/кг
—	25,4	0,2	—	9,2	48,0	42,8		Баланс отнесен к пламенному пространству
9,1	0,8	0,1	—	9,4	40,1	50,5 ⁷		Баланс отнесен к клапанам и циклу работы. Удельный расход тепла в твердом топливе 8250 кал/кг, потери в газогенераторе и газопроводах 17,5%.
2,9	—	—	—	4,3	48,3	47,4 ⁸		Баланс отнесен к клапанам и циклу работы. Удельный расход тепла в твердом топливе—19500 ⁹ кал/кг

части 4,6% и выработочной 2,3%, горелками 9,7%, дивановыми стенами с охлаждающей проток водой 1,3% и шпек — 0,9%, с воздухом, охлаждающим приходом тепла.

Определение размеров рабочей камеры ванн печей

Основные размеры пламенного пространства определяются из условий теплообмена. Поверхность слоя шихты и стекломассы должна быть достаточна для восприятия тепла, затрачиваемого на ее нагрев и протекание реакций стеклообразования. Кроме того, некоторое время необходимо поддерживать высокую температуру для завершения процессов стеклообразования и дегазации. Размеры пламенного пространства должны быть связаны с размерами факела.

Таким образом, необходимым элементом расчета стекловаренной печи должен быть расчет теплообмена в пламенном пространстве печи.

Расчет количества тепла, передаваемого в пламенном пространстве, необходимо подтвердить расчетом прогрева шихты и стекломассы. При этом следует учитывать, что шихте и стекломассе передается не только тепло, необходимое для стеклообразования и повышения температуры до нужной для успешной дегазации, но и теряемое в окружающую среду кладкой всего бассейна. Методика расчета конвекционных потоков стекломассы разработана советскими учеными. Ввиду сложности расчетов можно принять, что величина коэффициента потока составляет для печей с протоком 2—4 и для печей с лодками—6—10.

Расчеты теплообмена в стекломассе и конвекционных потоках составляют часть расчета стекловаренной печи.

Размеры студочной части должны быть достаточны для охлаждения поступающей в нее стекломассы до температуры, требуемой для формирования. Поэтому необходимо рассчитывать студочную часть.

Методика и результаты расчетов теплообмена в печи приведены на стр. 56 и 271. Они дают возможность определить площадь зеркала, требуемую для варки и дегазации, в зависимости от температур в пламенном пространстве и стекломассе, величин поверхности слоя шихты, положения, размеров и свойств факела.

Ввиду трудностей подобных расчетов, часто прибегают к использованию практических данных.

Практические данные о размерах площади зеркала стекла характеризуются допустимым удельным съемом стекломассы. Если допустимый съем стекломассы в единицу времени, например сутки, составляет K кг/м² и требуется сварить в сутки G кг стекломассы, то требуемая площадь F м² варочной части одной или нескольких печей определяется из выражения:

$$F = \frac{G}{K} \text{ м}^2. \quad (3)$$

Величины принимаемых съемов стекломассы с 1 м² зеркала стекла варочной части в сутки для обычных методов работы и режимов печей приведены в табл. 21.

Таблица 21

Съем стекломассы в кг/сутки с 1 м² зеркала варочной части печи

Вид стекла	Способ выработки	Тип печи	Съем стекломассы
Листовое	Механизированный	С лодками	670—1000
Бутылочное и тарное	Механизированный	С протоком	800—2000
Сортовое	То же	»	800—1400
Электроколбочное	»	»	600—1200

С повышением температур в печи, увеличением количества загружаемого боя и с улучшением качества огнеупорного материала, при прочих равных условиях, увеличивается допустимый съем стекломассы.

В печах периодического действия съем стекломассы в 1^{1/2}—3 раза ниже вследствие использования на варку лишь части времени.

Размеры студочного бассейна определяют из условий необходимости отдачи определенного количества тепла в окружающую среду.

В печах с протоком, вследствие малой величины коэффициента потока, студочная часть совмещена с выработочной. В производстве листового стекла применяются печи с лодками, коэффициент потока в которых велик. Поэтому в них выделяют студочную часть достаточно больших размеров.

Размеры студочной части определяют из уравнения теплового баланса, устанавливающего зависимость между размерами поверхности кладки студочной части, производительностью печи, коэффициентом потока, температурным режимом стекломассы и теплоотдачей из варочной части в газовом пространстве. Площадь зеркала студочной части определяется в соответствии с требуемыми размерами поверхности кладки.

Для расчета принимается определенным температурный режим стекломассы и пламенного пространства.

Трудности расчета размеров студочной части обусловлены неравномерностью температур стекломассы по сечению печи, необходимостью установления величин эффективных температур различных частей печи и величины коэффициента потока.

Ниже приведены практические данные о размерах студочной части печей.

Глубина бассейна должна выбираться с учетом прозрачности и вязкости стекломассы. Чем меньше прозрачность и выше вязкость стекломассы, тем меньше должна быть глубина бассейна.

Глубина бассейна печей периодического действия для прозрачного стекла невелика — 0,6—0,9 м и меньше. При значительной глубине на дне периодически действующей печи скапливается инородная инертная стекломасса, оказывающая влияние на состав и свойства вырабатываемого стекла.

При малой глубине бассейна интенсивные конвекционные потоки вовлекают в движение почти всю толщу стекломассы, благодаря чему выравнивается состав стекла и уменьшается влияние его остатка, но износ два увеличивается.

Варочные бассейны печей непрерывного действия для листового стекла имеют глубину 1,2—1,5 м, печей с протоком для бесцветного стекла 0,8—1,2 м. При варке вязких и малопрозрачных сортов стекла глубину бассейна уменьшают до 0,5—0,8 м и более.

В печах с лодками для листового стекла глубину студочной части бассейна часто уменьшают сравнительно с варочной (1,2 против 1,5 м), т. е. делают ее как бы переходной к более мелкой варочной части.

Глубину варочной части бассейна значительно уменьшают по сравнению с варочной частью.

Размеры пламенного пространства в плане определяют размерами бассейна, а по высоте — расположением факела пламени. Свод и стены должны быть достаточно удалены от факела во избежание износа. В то же время бесполезных объемов в печи следует избегать. Увеличение количества тепла, передаваемого излучением, благодаря увеличению поверхности кладки незначительно. Предельно сниженное положение свода при обычных шахтных горелках достаточно безопасно. Для печей с подковообразным и продольным пламенем расстояние между верхним краем летного отверстия и сводом должно быть не менее 300 мм. Расстояние между влетом и ограничивающей его стеной следует принимать с учетом раскрытия факела и расширения его при ударе о зеркало (двойной угол раскрытия 20—15°).

В печах с поперечным пламенем высота пламенного пространства складывается из высоты промежутка между бассейном и нижним горелочным брусом-зубом (80—120 мм), горелочного зуба (200 мм) и влета (400—900 мм), толщины влетной арки (250 мм) и подъема свода ($\frac{1}{7} \div \frac{1}{4}$ пролета $\sim 0,4—1$ м), т. е. составляет 1,3—2 м.

Применение плит, лежащих на стеновых брусках, взамен подвешиваемых зубьев и сопряжение влетов и свода позволяют снизить общую высоту на 400—500 мм.

Дополнительного снижения свода достигают, применяя полностью подвешенные плоские своды. Излишнего снижения сводов следует избегать во избежание их быстрого разгара.

Определение расхода топлива

При известных размерах рабочей камеры расход топлива определяется методом теплового баланса или по статистическим данным. При определении расхода топлива по статистическим данным важно учитывать размеры печи, так как к. п. д. стекловаренных печей мал и расход топлива в большей мере зависит от размеров печи, чем от производительности.

Определение расхода топлива по статистическим данным можно производить только для испытанных конструкций печей. Он зависит от сьема стекла.

Валовой расход тепла в ваннах печах обычно относят к единице площади варочной части, а в горшковых печах — к единице площади пода и выражают в виде количества потенциального тепла, вводимого в печь с топливом.

По статистическим данным расход тепла в потенциальном тепле топлива (газа и смол или жидкого топлива) составляет 70 000—105 000 кал/час на 1 м² варочной части ванной печи или 80 000—130 000 кал/час на 1 м² площади пода горшковой печи, считая на период варки и дегазации. Для малых печей и при худшем теперодстве следует брать большие величины, а для больших печей (относительно меньшая поверхность охлаждения), при хорошем теплостойкости и хорошей изоляции (особенно сводов и горелок) — меньше. В период студки и выработки для горшковых печей расход тепла в единицу времени примерно вдвое меньше, чем в период варки.

При определении расхода топлива методом теплового баланса приходными статьями являются: потенциальная теплота и теплота нагрева топлива, теплота нагрева воздуха и теплота нагрева шихты.

В число расходных статей теплового баланса входят: затрата тепла на процессы стеклообразования, теплота нагрева стекломассы до температуры, соответствующей границе баланса, затрата тепла на испарение влаги шихты, потери с отходящими газами и окружающую среду (включая нагрев охлаждающих воздуха и воды). В печах периодического действия тепло дополнительно затрачивается на прогрев кладки, горшков и остаточной стекломассы.

Процессы стеклообразования протекают в основном с поглощением тепла. Тепло поглощается при разложении солей и при некоторых других реакциях. При образовании силикатов тепло выделяется.

Приводим данные о теплоте разложения и образования некоторых соединений.

При разложении	CaCO ₃	затрачивается	на 1 кг CaO	758,0	кал
	>	>	> 1 > CaCO ₃	425,2	>
	>	>	> 1 > Na ₂ O	1240,0	>
	>	>	> 1 > Na ₂ CO ₃	725,5	>

При разложении Na_2SO_4 затрачивается на 1 кг Na_2O	2182,2	»
» Na_2SO_4	952,8	»
» MgCO_3	729,0	»
» MgCO_3	349,0	»
При образовании Na_2SiO_3 выделяется	911,5	»
» K_2SiO_3	669,0	»
» CaSiO_3	410,0	»

Данные о расходе тепла на варку стекла при трехкомпонентной содовой или сульфатной шихте приведены на рис. 106. В них также учтен расход тепла на нагрев стекломассы до 1200° .

В случае расчета расхода тепла на нагрев стекломассы, нужно учитывать изменение теплоемкости стекла с температурой.

По Ботвинкину средняя теплоемкость стекол, не содержащих окислов тяжелых металлов, при температурах ниже и выше аномального интервала характеризуется следующими уравнениями:

$$c_{p0-200} = 0,1794 + 0,632 \cdot 10^{-4}t; \quad (4a)$$

$$c_{p100-1200} = 0,1605 + 1,1 \cdot 10^{-4}t. \quad (4b)$$

Расход тепла определяется по затрате тепла на получение стекломассы Q (варка), покрытие потерь с отходящими газами $Q_{2,3}$ (отх. газы) и в окружающую среду $Q_{4,5}$ (окр. среда):

$$Q = Q_1 \text{ (варка)} + Q_{2,3} \text{ (отх. газы)} + Q_{4,5} \text{ (окр. среда)}. \quad (5)$$

При введении в клапан регенеративной печи неочищенного генераторного газа полезно использовать только часть теплоты нагрева газа. Если суммарный объем двух регенераторов неизменен и именно таков, каким его принимаю при низкой температуре газа с расчетом подогрева газа и воздуха до 900 или 1000°, то полезно использовать приблизительно 30% количества теплоты нагрева газа. За счет остальных 70% увеличивается теплота нагрева отходящих газов. Таким образом:

$$Q = V(Q_{\text{пот}} + 0,3Q_{\text{наг}}) \text{ кал/м}^2 \text{ час}, \quad (6)$$

где: V — расход газа на 1 м² зеркала бассейна или пода в м³/м² час;

$Q_{\text{пот}}$ — теплотворная способность газа в кал/м³;

$Q_{\text{наг}}$ — теплота нагрева газа в кал/м³.

Далее $Q_1 \text{ (варка)} = Pn, \quad (7)$

где: P — стем стекломассы в кг/м² час;

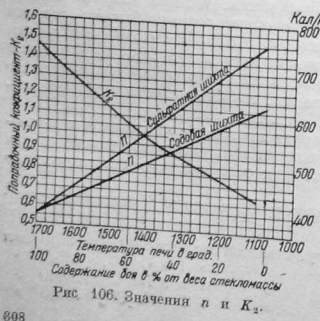


Рис. 106. Значения n и K_2 .

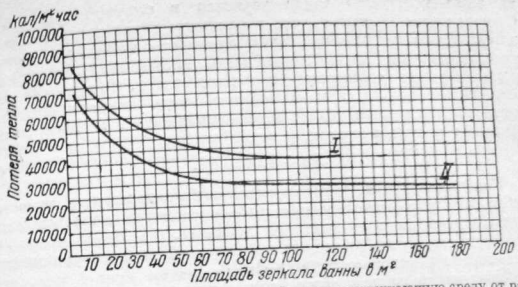


Рис. 107. Зависимость потерь тепла всей печью в окружающую среду от размеров печи: I — потери, отнесенная к 1 м² варочной части; II — потери, отнесенная к 1 м² всей площади печи.

n — расход тепла на получение стекломассы при температуре выработки в кал/кг.

Величина $Q_{2,3}$ (отх. газы) составляет долю величины Q , т. е. $Q_{2,3} = k_1 Q$. Если учитывать приведенным способом использование теплоты нагрева газа (введение коэффициента k_1), то для ванн печей можно принять $k_1 = 0,2-0,3$ и для горшковых $0,25-0,35$.

Потери тепла в окружающую среду W кал/м² час зависят от размеров печи и характеризуются кривыми I и II на рис. 107. Предложенная Д. Б. Гинзбургом формула для определения расхода тепла имеет следующий вид:

$$Q = Pn + W + k_1 Q' \text{ кал/м}^2 \text{ час} \quad (8)$$

или

$$Q = V(Q_{\text{пот}} + 0,3Q_{\text{наг}}) = \frac{Pn + W}{1 - k_1} \text{ кал/м}^2 \text{ час} \quad (9)$$

и удельный расход тепла

$$q = \frac{Q}{P} = \frac{n + \frac{W}{P}}{1 - k_1} \text{ кал/кг}. \quad (10)$$

Значения Q , P и W могут быть отнесены к варочной части или общей площади печи. Циркулирующий поток стекломассы не рассматривается, так как тепло, затрачиваемое на его нагрев, учтено в величине W .

Величина Pn должна соответствовать количеству тепла, передаваемому при данных режимных условиях (температура, степень черноты и размеры факелов) стекломассе в зоне собственно варки (рис. 88, 89). При этом следует учитывать, что $\sim 8000-10000$ кал/м² час

из этого количества тепла теряется в окружающую среду. Следует также учитывать, что в основном тепло воспринимается поверхностью шихты и что шихта занимает от 50% (при крупной загрузке) до 90% (при тонкослойной загрузке) поверхности зеркала собственно варочной части. Таким образом, если поверхность шихты составляет долю площади варочной части k и количество тепла, воспринимаемого 1 м² поверхности шихты от факела и кладки, Q кал/м² час, то

$$Pn + 8000 = Qk. \quad (11)$$

Количество тепла, передаваемого в зоне дегазации, является небольшим и в основном при выборе размеров зоны дегазации руководствуются практическими данными.

Формулы (9) и (10) верны при средней температуре кладки планового пространства 1400—1440°.

Увеличение расхода тепла, связанное с повышением температуры в печи, можно учесть с помощью коэффициента k_2 , значения которого приведены на рис. 106.

ПЕЧИ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТЕКЛЯННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Стеклоянные изделия подвергают термической обработке в целях отжига, закалки, изменения окраски («наводки») и формы (молдирования).

Наибольшее распространение имеют печи для отжига изделий, рассматриваемые ниже.

1. ПРОЦЕСС ОТЖИГА

Отжиг заключается в выдерживании определенного режима охлаждения изделия с целью удаления и выравнивания остающихся напряжений, которые возникли при его формовании. Удаление и выравнивание остающихся напряжений возможно в температурном интервале отжига, который лежит в пределах 400—550° в зависимости от состава стекла. При температурах ниже интервала отжига остающиеся напряжения не могут возникнуть.

Процесс отжига изделий складывается из следующих стадий: 1) нагрева до температуры отжига, 2) выдерживания при температуре отжига, 3) охлаждения.

Режим отжига определяется толщиной и формой изделий, составом стекла и количеством допускаемых остающихся напряжений (для большинства стекол не более 20% разрушающих). Как правило, кривая отжига состоит из участков, соответствующих стадиям процесса. Охлаждение изделий производится с различной скоростью: до нижней температуры отжига — медленно, а затем со скоростью, определяющейся термической стойкостью изделий.

На выдерживание изделий при температуре отжига затрачивается 5—20 мин. и больше в зависимости от толщины стекл

изделия. Охлаждение до нижней температуры отжига для большинства полых изделий производится со скоростью 1—20 град/мин. В вертикальных шахтах машин для листового стекла скорость охлаждения в нижней части шахты составляет до 200 град/мин. и в верхней — до 50 град/мин.

Приятный режим отжига должен привести к максимальному удалению остающихся в изделии напряжений, исключению возможности возникновения их, сохранению формы изделиями и минимальной продолжительности отжига.

2. УСТРОЙСТВО ПЕЧЕЙ

Отжигательные печи делятся на две группы: периодического и непрерывного действия.

Печи периодического действия (обычно камерные) используют для отжига малых количеств изделий или трудно отжигаемых изделий, требующих соблюдения особого режима. Печи непрерывного действия (обычно туннельные) применяются в остальных случаях и они наиболее широко распространены.

Конструктивное оформление камерных и туннельных печей зависит от вида отжигаемых изделий.

Так как в процессе отжига осуществляется отдача тепла от изделий по установленному режиму, то на собственно процесс отжига не требуется затраты тепла, если изделия поступают в печь с температурой выше температуры отжига. В отжигательных печах тепло расходуется на возмещение потерь тепла ограждениями печи. Чем больше производительность отжигательной печи, т. е. чем больше тепла вносятся изделия, тем меньше расход топлива на отжигательную печь. Предельным случаем является работа отжигательной печи без дополнительного отопления. Это достигается в лучших отжигательных печах непрерывного действия, имеющих высокую производительность и снабженных хорошей тепловой изоляцией.

Печи периодического действия

Отжигательная печь периодического действия («опечек») представляет собой камеру печь (рис. 108). В случае отопления твердым топливом печь снабжается одной или двумя топками. Для более равномерного обогрева печной камеры и уменьшения температурного градиента между сводом и подом камеры под подом устраивают ряд каналов и отводят по ним дымовые газы. Более совершенными являются печи с газовым и электрическим отоплением.

Перед началом работы печь разогревают до требуемой температуры, после чего производят загрузку изделий. По окончании загрузки обегв печи прекращается и печь охлаждается в течение 1—3 суток, в зависимости от размера изделий и требуемого режима отжига.

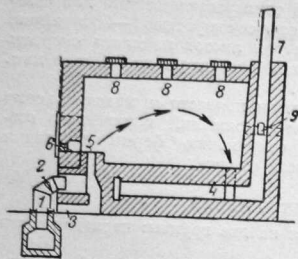


Рис. 108. Камерная отжигательная печь:
1—газопровод; 2—заслонка; 3—подвод воздуха; 4—подпоровый дымовой канал; 5—отверстие для регулирования распределения газов; 7—дымовая труба; 8—отверстие в своде для ступня печи; 9—канал для отвода газов, минуя подпоровые каналы.

ся чрезвычайно медленное понижение температуры (10—15 град/сутки).

Расход тепла на 1 кг отжигаемых изделий составляет 2500—4000 кал.

Печи непрерывного действия

Наиболее широко распространены, особенно при механизированном производстве, туннельные отжигательные печи непрерывного действия (вагонеточные тигуны, конвейерные печи).

В зависимости от способа обогрева эти печи подразделяют на пламенные и муфельные. Отжигаемые изделия движутся на специальном транспортирующем приспособлении (вагонетках, конвейерной ленте, элеваторных ковшах). По длине туннеля поддерживают надлежащий температурный режим. Зона максимальной температур должна быть расположена возможно ближе к месту загрузки изделий, а распределение температур в любом сечении достаточно равномерно, и должна иметься возможность поддерживать и регулировать требуемый режим.

Современные отжигательные печи непрерывного действия полностью удовлетворяют этим требованиям.

Наиболее простой конструкцией отжигательной печи непрерывного действия является тигун — пламенная туннельная печь с вагонетками (рис. 109). Печь представляет собой длинный туннель со снижающимся сводом, в котором проложен рельсовый путь и движутся вагонетки с изделиями. В боковых стенках головной части туннеля расположены вертикальные каналы, по которым из топки поступают продукты горения генераторного газа.

Недостатки печей периодического действия: небольшая производительность, неравномерное распределение температур, большой расход тепла и затруднительность механизации обслуживания.

Достоинство печей периодического действия заключается в возможности отжига крупных изделий, а также легкости регулирования режима, что очень важно при изменяющемся ассортименте изделий.

В настоящее время печи периодического действия применяют для отжига крупных, толстостенных изделий и для тонкого отжига оптических стекол, при котором требуется

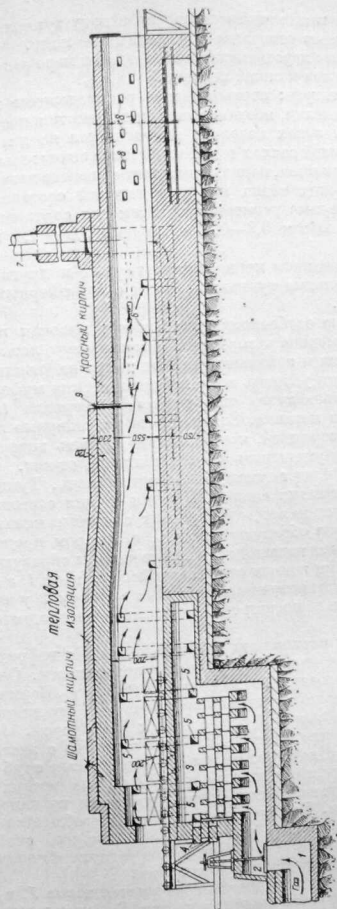


Рис. 109. Туннельная отжигательная печь с вагонетками:
1—газопровод; 2—заслонка; 3—насосная камера; 4—отверстие для впуска воздуха; 5—нашипы для подвеса газов в печи; 6—отверстия для отвода отходящих газов; 7—дымовая труба; 8—отверстия для впуска воздуха; 9—заслонки в газовой зоне; 10—отверстие для впуска воздуха.

Они поступают также через отверстия в полу туннеля. Дымовые газы отводятся через отверстия в стенках и в полу.

Периодическое передвижение вагонеток по мере заполнения их осуществляется при помощи лебедки.

Недостатки тягуна: неравномерное распределение температур в поперечном сечении, неодинаковая продолжительность выдержки в различных зонах изделий, находящихся на дне вагонетки и сверху, и большой расход тепла вследствие значительных потерь (наличие больших окон, периодическое открывание дверей в головной части). Расход тепла на 1 кг изделий составляет 1000—2000 кал. Примерные размеры вагонеток для сортового и бутылочного стекла: высота 0,3—0,4 м, ширина 0,8—1,4 м и длина 0,9—1,5 м.

В механизированном производстве тарных и других изделий применяют муфельные туннельные печи с конвейерным передвижением изделий.

Отличительные особенности этих печей: высокая производительность, равномерное распределение температур, легкость регулирования режима и небольшой расход тепла на отжиг.

Для улучшения условий теплопередачи стенки муфеля делают из высокотеплопроводного огнеупорного материала (например, карбофракса) или металла. Современные конвейерные печи снабжены хорошей изоляцией, что позволяет снизить потери в окружающей среде и уменьшить расход тепла на отжиг.

На рис. 110 представлена конвейерная печь. Туннель печи состоит из 39 чугунных секций. Каждая секция состоит из трех газонепроницаемых камер, образующих сквозные каналы.

Средние камеры образуют туннель, в котором проходит конвейер с отжигаемыми изделиями. Нижние камеры образуют канал 3 для обогрева, одним концом сообщающийся с топкой 1, а другим — с эксгаустером, установленным вместе с мотором 2 у выходного конца печи. Канал по ширине разделен перегородками на несколько частей.

Над туннелем расположен верхний канал 4 с гофрированным полом для увеличения теплоотдающей поверхности. Он служит для пропускания воздуха, охлаждающего туннель. Верхний канал не доходит до головной части печи примерно на $\frac{1}{3}$ его длины. У разгрузочного конца канал 4 сообщается с атмосферой. Над каналом расположена отводная труба 6, соединенная с эксгаустером и сообщающаяся с каналом рядом соединительных труб 5, снабженных регулирующими клапанами. Холодный воздух засасывается у разгрузочного конца печи и движется по направлению к головной части. Нижний канал 3 также сообщается с отводной трубой 6 с помощью ряда боковых каналов, снабженных клапанами. Кроме того возможен подсос воздуха в канал 3 через трубки 7, также снабженные клапанами.

В головной части печи имеется небольшая топка 1, в которой сжигается газовое или жидкое топливо. Горячие газы протяги-

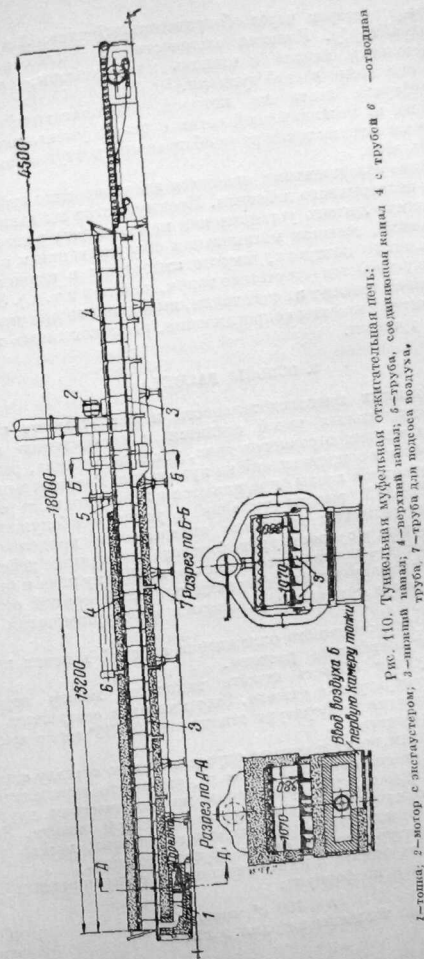


Рис. 110. Туннельная муфельная отжигающая печь:

1 — топка; 2 — мотор с эксгаустером; 3 — шпальный канал; 4 — верхний канал; 5 — труба, соединяющая канал 4 с трубой 6 — отводная труба; 6 — труба для подсоса воздуха; 7 — труба для подсоса воздуха; 8 — отверстие

ваются эжектором через обогревательный канал 3 и отводятся в дымовую трубу. Изменяя количество открытых клапанов в обогревательном канале и степень их открытия, регулируют обогрев отдельных частей туннеля.

Конвейерная лента на которой располагаются изделия, изготовлена из металлической сетки с целью уменьшения тепловых потерь и затраты тепла на ее обогрев при поступлении в головную часть печи.

Наиболее совершенными являются электрические отжигательные печи непрерывного действия. Преимущества их заключаются в возможности легкого установления надлежащего режима и его регулирования, легкости механизации обслуживания и автоматизации теплового контроля, чистоте атмосферы в печной камере и простоте устройства (отсутствие топок, каналов и т. д.). Электрические печи обогревают за счет тепла, выделяемого при прохождении тока через элементы сопротивления, расположенные на полу и у свода туннеля.

3. ОСНОВЫ РАСЧЕТА

При заданных производительности и ассортименте изделий расчет отжигательных печей сводится к составлению кривой отжига и определению размеров печи, расхода топлива, размеров топок и горелок и сопротивлений на пути газов. Размеры и емкость камеры, вагонеток и ленты определяются в зависимости от размера и формы изделий, высоты укладки и условий обслуживания. Скорость продвижения вагонеток определяется продолжительностью загрузки, а скорость транспортного непрерывно действующего устройства — производительностью его. Длину печи и отдельных зон устанавливают на основании принятой кривой отжига. Ширина и высота туннеля определяются конструктивными соображениями.

В случае искусственного охлаждения изделий в печах производятся дополнительные расчеты.

Температурная область отжига находится между верхней и нижней температурами отжига. Этот интервал составляет 50—100°. Практическая температура отжига на 20—30° ниже высшей температуры отжига.

Расчетная температура отжига определяется по составу стекла. Замещение в стекле известного состава, имеющего определенную температуру отжига, 1% SiO₂ таким же количеством другого стеклообразующего окисла изменяет температуру отжига. Зная температуру отжига стекла определенного состава, можно рассчитать температуру отжига стекла другого состава.

Длительность отжига n мин. большинства промышленных стекол определяется по формуле:

$$n = 100 a^2 \text{ мин.}, \quad (12)$$

где a — половина толщины изделия в см.

Скорость медленного охлаждения на 100° определяется по формулам:

$$h_0 = \frac{0,4}{a^2} \text{ град./мин. (при 5\% остającychся натяжений)} \quad (13)$$

и

$$h_0 = \frac{1,3}{a^2} \text{ град./мин. (при 20\% остającychся натяжений)}. \quad (14)$$

Скорость быстрого охлаждения (обычно в интервале 450—50°) составляет 10—15 град./мин. Быстрое охлаждение можно начинать со скоростью:

$$h' = \frac{h_0}{2} \left(1 + \frac{t_0 - t_1}{10} \right) \text{ град./мин.}, \quad (15)$$

где: h_0 — скорость медленного охлаждения в град./мин;

t_0 — практическая температура отжига стекла в град.;

t_1 — низшая критическая температура отжига в град.

Скорость охлаждения постепенно увеличивается и может доходить до максимальной $\frac{10}{a^2}$ град./мин.

Расход топлива определяют методом теплового баланса. При расчете печей периодического действия тепловые балансы составляют для каждого периода. При расчете печей непрерывного действия тепловые балансы составляют позонно.

ПЕЧИ ПРОИЗВОДСТВА ВЯЖУЩИХ МАТЕРИАЛОВ

1. ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ ВЯЖУЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Процесс обжига вяжущих веществ заключается в тепловой обработке исходных материалов, обеспечивающей протекание ряда физико-химических процессов: дегидратации, кальцинирования, клинкерообразования.

Процессу собственно обжига предшествует сушка материалов. Продолжительность периода сушки и расход тепла на удаление механически связанной влаги зависят от влажности материалов. Так, например, при обжиге известняка, влажность которого не превышает 10%, период сушки составляет незначительную часть полной длительности обжига, и расход тепла на обезвоживание мало влияет на общий расход тепла. При обжиге же печаша, когда влажность шлама составляет, примерно, 40%, зона сушки занимает около половины печи, и расход тепла на испарение влаги достигает 35% от общей затраты тепла на обжиг.

Производство гипсовых вяжущих веществ, теория которого развита в трудах П. П. Будникова, основано на дегидратации двуводного гипса до полуводного или безводного ангидрида. Температура обжига строительного полуводного гипса составляет 120—180°. В производстве ангидритового цемента обжиг гипса осуществляется при температуре 600—700°. При температуре обжига 800—1000° получается так называемый эстрих-гипс.

Основой производства известки является процесс диссоциации CaCO_3 . Парциальное давление CO_2 достигает атмосферного значения известки температура в печи доводится до 1200—1300°.

Теорию обжига цементного клинкера наиболее полно разработал В. Н. Юнг. При температуре 450° начинается дегидратация содержащегося в глине каолина, а затем происходит диссоциация карбонатов. Реакции между CaO и кислотными окислами начинаются в твердом состоянии еще до завершения диссоциации CaCO_3 , однако скорость их становится значительной только при температуре около 1000°. Тепло, выделяющееся при

образовании силикатов, алюминатов и ферритов кальция (около 100 кал/кг клинкера), способствует быстрому повышению температуры материала до 1280°, при которой обычно происходит частичное его плавление. Количество жидкой фазы достигает 20—30%, причем на ее образование затрачивается около 50 кал/кг клинкера. К этому моменту Al_2O_3 и Fe_2O_3 связаны в виде $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ и $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, а SiO_2 в виде $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$. Далее происходит растворение CaO в жидкой фазе и взаимодействие ее с $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ с образованием $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$. Вследствие большой вязкости силикатных расплавов, образование $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ протекает довольно медленно и завершается при температуре 1400—1450°.

Тепловым эффектом клинкерообразования называется количество тепла, теоретически необходимого для получения, без материальных и тепловых потерь, из сухого сырья с температурой 0°, 1 кг клинкера с той же температурой. При получении клинкера из известняка или мела и доменного шлама, вследствие наличия в последнем готовых силикатов кальция, тепловой эффект клинкерообразования меньше, чем при обычном сырье (известняке или меле и глине).

Непосредственно за обжигом вяжущих материалов обычно следует их охлаждение воздухом, используемым для горения.

Тепловые эффекты процессов, происходящих при обжиге вяжущих материалов, приведены в табл. 22.

Таблица 22

Тепловые эффекты процессов, происходящих при обжиге вяжущих материалов

№ п/п.	Наименование процесса	Тепловой эффект в кал/кг
1	Дегидратация двуводного гипса до полуводного	138
2	Дегидратация двуводного гипса до ангидрида	173
3	Дегидратация каолина	218
4	Диссоциация углекислого магния	195
5	Диссоциация углекислого кальция	396
6	Образование цементного клинкера:	
	а) из известняка или мела и глины	~ 400
	б) из известняка или мела и доменного шлама	~ 250

Процессы испарения, дегидратации и диссоциации при обжиге вяжущих материалов протекают при температурах более высоких, чем теоретически необходимые по условиям равновесия.

Так как повышение температуры чрезвычайно ускоряет указанные эндотермические процессы, то они не лимитируют скорость обжига, которая определяется в основном скоростью теплопередачи.

После спекания цементного клинкера дальнейшего нагревания материала почти не требуется, а нужно выдержать его при определенной температуре в течение времени, необходимого для завершения физико-химического процесса, скорость которого определяет в данном случае скорость обжига.

В зависимости от химического состава сырьевой смеси и минералогической структуры исходных материалов необходимая выдержка цементного клинкера при температуре обжига 1400—1450° составляет 10—20 мин.

Если в сырьевой смеси содержится много известки и мало полуторных оксидов или сырьевые материалы отличаются низкой реакционной способностью (например, в случае запесоченной глины), то для получения более высокой температуры и большей длительности обжига за счет сокращения прямой отдачи тепла в зоне горения топлива приходится уменьшать подачу материала в печь. В этих случаях для понижения температуры и длительности обжига в сырьевую смесь вводят плавни (главным образом содержащие Fe_2O_3) или минерализаторы (около 1% плавикового шпата), что позволяет повысить производительность печи, примерно, на 10% и сократить удельный расход тепла на обжиг, примерно, на 5%, вследствие снижения температуры отходящих газов и уменьшения удельной потери тепла в окружающую среду.

2. ВРАЩАЮЩИЕСЯ ПЕЧИ

Физико-химические процессы происходят во вращающейся печи под влиянием тепловой энергии, которая развивается при горении топлива и передается обжигаемому материалу в условиях движения последнего навстречу продуктам горения.

Вращающаяся печь (рис. 118) представляет собой полый стальной барабан, футерованный огнеупорным кирпичом.

Сырьевые материалы подаются в печь по наклонной течке. Благодаря уклону и вращению печи они перемещаются к нижнему концу. Топливо и воздух вводят через нижний конец печи, вблизи которого происходит горение. От 15 до 35% воздуха, потребного для горения топлива, подается через форсунку. Остальная часть воздуха поступает из соединенного с печью холодильника за счет разрежения, создаваемого дымовой трубой или эксгаустером. В холодильнике воздух подогревается охлаждающимся материалом. Отходящие из печи газы проходят через пылеосадительное устройство и далее с помощью дымовой трубы

или эксгаустера отводятся в атмосферу. Улавливаемая пыль системой шнеков и элеватором подается в специальный сборник и поступает опять в печь.

Первые вращающиеся печи имели диаметр 1,8 м и длину 18 м. Довольно скоро эти размеры возросли и в течение длительного периода не превосходили значений соответственно 3 м и 70 м. Наряду с печами цилиндрического профиля начали выпускаться печи с расширенной зоной горения, что преследовало следующие цели: 1) увеличение объема зоны горения и, следовательно, тепловой мощности печи—количества тепла, выделяемого в единицу времени и 2) увеличение количества передаваемого материалу тепла, вследствие возрастания поверхности теплопередачи и толщины излучающего газового слоя. При расширении зоны горения в отдельных случаях фиксировалось повышение производительности печи до 30% по сравнению с печью постоянного диаметра и такой же длины. Кроме того, наблюдалась экономия 5—12% топлива и улучшение качества продукции.

Вращающиеся печи без каких-либо внутренних или дополнительных устройств не приспособлены для эффективной передачи тепла в области температур ниже 1000° и поэтому постепенно вытесняются более совершенными конструкциями. В настоящее время они применяются, главным образом, при сухом способе производства цемента, а также для обжига известки, ангидрида, эстрих-гипса, шамота и магнезита.

При обжиге металлургического магнезита (температура обжига 1650°) топливом служит мазут, который сжигается с небольшим избытком воздуха. Топливом для обжига цементного клинкера при температуре 1400—1450° являются мазут, угольная пыль, естественный или коксовый газ. Применение генераторного газа неприемлемо с экономической точки зрения, вследствие необходимости высокого подогрева газа и воздуха для достижения требуемых температур. Для обжига шамота при температуре 1300—1350° и известки при температуре 1200—1300° можно применять генераторный газ с той или иной степенью подогрева. При использовании для обжига известки угольной пыли, вследствие присадки золы, на кусках известки образуется пленка, затрудняющая впоследствии гашение. Поэтому применение малозольного или беззольного топлива. При обжиге каолического магнезита (1000°), а также низкокоченного шамота (700—800°) топливо сжигают в печи с повышенным избытком воздуха или печь снабжают выносной топкой со смешительной камерой.

Процесс развития собственно вращающейся печи шел по линии возрастания отношения длины к диаметру, с целью улучшения теплоспользования, при одновременном увеличении абсолютных размеров печи для повышения производительности. Одновременно вращающиеся печи для обжига цементного клинкера при мокром способе производства снабжались различными внутренни-

ми устройствами, увеличивающими поверхность теплопередачи между газами и материалом. Из всех этих устройств наилучшим образом оправдали себя цепи.

Длина вращающейся печи с цепями по сравнению с полкой печью, имеющей ту же температуру отходящих газов, примерно, на 30% меньше. Стремление навесить в печи большое количество цепей, не увеличив при этом значительно скорость газов и не затруднив продвижение материала, привело к расширению зоны подсушки вращающейся печи. Значительное гидравлическое сопротивление, создаваемое цепями и эффективными пылесоса-тельными устройствами, а также низкая температура газов, отходящих из длинных печей, обусловили переход на искусственную тягу.

Вращающаяся печь с цепями, у которой отношение длины к внутреннему диаметру составляет 40-50, является основным современным агрегатом для обжига цементного клинкера при мокром способе производства. Она надежна в эксплуатации и отличается значительной мощностью, а также высоким качеством продукции при экономичном, а также высоком расходе тепла и энергии. В такой печи могут перерабатываться практически любые сорта сырья и использоваться многие виды твердого, жидкого и газообразного топлива.

Другое направление развития вращающихся печей заключалось в соединении с ними различных устройств для использования теплоты отходящих газов.

Движение материала

Механизм движения материала во вращающихся печах в первом приближении может быть сведен к схеме, предусматривающей идеальное пересыпание и не учитывающей складки и выклинивания у стенок и внутри слоя, фракционирования материала и т. д.

Вследствие малого числа оборотов вращающейся печи частицы материала перемещаются вместе с печью до тех пор, пока не достигают плоскости, образующей с горизонталью угол, приблизительно равный углу естественного откоса материала, после чего скатываются по этой плоскости под влиянием силы тяжести.

Частица материала, начав движение в точке *D* (рис. 111), описывает дугу *DE*, затем скатывается в ту или иную точку, расположенную в нижней части плоскости *AB*, после чего цикл движения повторяется.

Совершая циклическое движение в слое материала по параллельным дугам, частица через определенное число циклов попадает на футеровку. Период времени, нужный для того, чтобы выйти из точки *B*, расположенной на футеровке, частица вновь вернулась в это положение, продвинувшись на известное расстояние по длине печи, назовем полным циклом движения и т. д. Таким образом, в течение полного цикла движения частица

один раз попадает на футеровку. За период одного цикла движения каждая частица выходит на поверхность слоя материала, где длительность ее пребывания ничтожна, все же остальное время она находится в толще слоя.

Если условно принять, что частицы материала имеют форму шара, то количество частиц, приходящееся на 1 м длины печи, выразит следующим образом:

$$m = \frac{\pi \cdot D^2 \rho}{4 \cdot d^3} \quad (1)$$

Количество частиц на 1 м длины печи, находящихся на футеровке:

$$m_{\text{ф.м}} = \frac{l_{\text{ф.м}}}{d^2} \quad (2)$$

Количество частиц на 1 м длины печи, находящихся на поверхности слоя материала:

$$m_{\text{с.м}} = \frac{l_{\text{с.м}}}{d^2} \quad (3)$$

Длительность цикла движения в мин., равная периоду нагрева частицы на футеровке:

$$\tau_{\text{д.м}} = \frac{l_{\text{д.м}}}{\pi D \cdot n} \quad (4)$$

Период нагрева частицы на поверхности слоя в мин.:

$$\tau_{\text{с.м}} = \frac{m_{\text{с.м}}}{m} \tau_{\text{д.м}} = \frac{0,405 \cdot l_{\text{с.м}} \cdot l_{\text{д.м}} \cdot d}{l^3 \cdot \rho \cdot n} \quad (5)$$

Длительность полного цикла движения в мин.:

$$\tau = \frac{m}{m_{\text{ф.м}}} \tau_{\text{д.м}} = \frac{0,25 D^2}{d \cdot n} \quad (6)$$

В формулах (1)–(6) приняты следующие обозначения:

- D* — внутренний диаметр печи в м;
- φ — коэффициент заполнения сечения печи материалом;
- d* — диаметр частиц материала в м;
- l*_{д.м.} — длина дуги футеровки, закрытой материалом, в м;
- l*_{с.м.} — длина хорды, совпадающей с поверхностью слоя материала, в м;
- n* — число оборотов печи в об/мин.

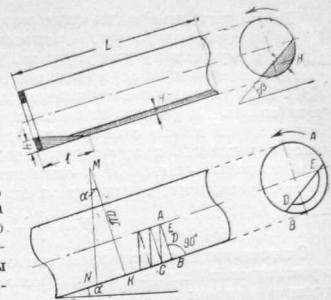


Рис. 111. Схема движения материала во вращающейся печи

Коэффициент заполнения печи материалом составляет около 8%, и средний радиус дуг, описываемых частицами материала, близок к внутреннему радиусу печи. Тогда траектория движения частицы материала за один цикл может быть изображена линией ВАС. Если просуммировать траекторию частицы за один оборот печи (на рис. 111 условно показаны три цикла), то путь, проходимый частицей вместе с печью, изобразится линией КМ, длина которой равна πD , а путь свободного падения по поверхности слоя материала — линией MN. Зная наклон печи к горизонту $i\%$, найдем продвижение материала за один оборот печи KN:

$$KN = \frac{\pi D \cdot i}{100} \quad (7)$$

Скорость движения материала в печи W_m м/мин., в соответствии с рассмотренной идеальной схемой его движения, выразится следующим образом:

$$W_m = \frac{\pi D \cdot i \cdot n}{100} \quad (8)$$

Число периодов нагрева частицы материала на футеровке, имеющих место на протяжении одного диаметра печи, равно:

$$n_{\partial m} = \frac{D}{W_m \cdot \tau} = \frac{127 \cdot d}{D \cdot i \cdot \tau} \quad (9)$$

Число периодов нагрева частицы на поверхности слоя материала, имеющих место на протяжении 1 диаметра печи, составляет:

$$n_{x m} = \frac{D}{W_m \cdot \tau_{\partial m}} = \frac{100 \cdot D}{i \cdot i_{\partial m} \cdot \tau} \quad (10)$$

При изменении наклона печи обратно пропорционально скорости ее вращения и неизменном расходе материала скорость движения материала и коэффициент заполнения печи остаются постоянными. Следовательно, в соответствии с формулами (4), (5), (9) и (10), при изменении скорости вращения печи длительность периодов нагрева и их число изменяются обратно пропорционально друг другу.

При неизменных наклоне печи и расходе материала скорость движения материала прямо пропорциональна, а коэффициент заполнения печи обратно пропорционален скорости вращения. Длительность периодов нагрева изменяется в большей степени, чем их число.

При наличии в печи подпорого кольца скорость движения материала на расстоянии от него, равно

$$l = \frac{h \cdot 100}{i} \quad (11)$$

на основании опытных данных выражается формулой:

$$W_m = \frac{(D - h - 0,5 H) n \cdot i}{0,308 (\beta + 24)} \cdot \frac{2H}{h + \sqrt{Hh}} \quad (12)$$

В остальной части печи

$$W_m = \frac{D n i}{0,308 (\beta + 24)} \quad (13)$$

где: H — высота слоя материала вдали от подпорого кольца в м;
 h — высота подпорого кольца в м;
 β — угол естественного откоса материала в град.

Величина H определяется по величине φ , которая входит в формулу, выражающую производительность печи, как транспортера. G кг/час:

$$G = 60 \cdot \frac{\pi D^2}{4} \varphi W_m \gamma \quad (14)$$

где γ — насыпной вес материала в кг/м³.

Формула (13) отличается от теоретической формулы (8) значением коэффициента и тем, что в нее введен угол естественного откоса материала, учитывающий его индивидуальные особенности.

Теплопередача

В полой части вращающейся печи происходит теплообмен между газами, футеровкой и материалом.

Тепло от газового потока передается открытым поверхностям футеровки и материала лучением и конвекцией, а также путем смешения газам, выделяющимся из материала. В свою очередь, тепло, получаемое футеровкой, передается открытой поверхности материала лучением и конвекцией, а также через поверхность материала — теплопроводностью, а также через наружную поверхность печи — теплопроводностью, и конвекцией. Балансовые уравнения тепловых потоков имеют таким образом следующий вид:

$$Q_z = Q_{z\partial}^g + Q_{z\partial}^k + Q_{z,m}^g + Q_{z,m}^k + Q^c \quad (15)$$

$$Q_{z\partial}^g + Q_{z\partial}^k = Q_{z,m}^g + Q_{z,m}^k + Q_n \quad (16)$$

$$Q_m = Q_{z,m}^g + Q_{z,m}^k + Q_{z,m}^g + Q_{z,m}^k \quad (17)$$

где: Q_z — общее количество тепла, отдаваемое газовым потоком, в кал/м час;

$Q_{z\partial}^g$ — количество тепла, отдаваемое газовым потоком футеровке лучением, в кал/м час;

$Q_{z\partial}^k$ — количество тепла, отдаваемое газовым потоком футеровке конвекцией, в кал/м час;

$Q_{z,m}^g$ — количество тепла, отдаваемое газовым потоком материалу лучением, в кал/м час;

$Q_{z,m}^k$ — количество тепла, отдаваемое газовым потоком материалу конвекцией, в кал/м час;

Q^c — количество тепла, отдаваемое газовым потоком путем смешения газам, выделяющимся из материала, в кал/м час;

- $Q_{\text{ф.м}}$ — количество тепла, отдаваемое футеровкой материалу
лучеспусканием, в кал/м час;
 $Q_{\text{ф.м}}^*$ — количество тепла, отдаваемое футеровкой материалу
теплопроводностью, в кал/м час;
 Q_n — количество тепла, теряемое в окружающую среду, в
кал/м час;
 Q_m — общее количество тепла, получаемое материалом, в
кал/м час.

Количества тепла, отдаваемые излучением и конвекцией газовым потоком открытым поверхностям футеровки и материала на единице длины печи, а также количество тепла, отдаваемое открытой поверхностью футеровки открытой поверхности материала излучением и териемом в окружающую среду, выражаются соответственно уравнениями (31), (32), (33), (34), (35) (глава III) и уравнением (13) (глава XI).

Количество тепла, отдаваемое закрытой поверхностью футеровки материалу на единице длины печи, в первом приближении определяется по уравнению

$$Q_{\text{ф.м}}^* = 4,96 \cdot E_{\text{ф}} \cdot E_m \left[\left(\frac{T_{\text{ф}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right] l_{\text{д.м}}, \quad (18)$$

- где: $T_{\text{ф}}$ — абсолютная температура футеровки в °К;
 T_m — абсолютная температура материала в °К;
 $E_{\text{ф}}$ — степень черноты футеровки ($E_{\text{ф}} = 0,95$);
 E_m — степень черноты материала ($E_m = 0,9$);
 $l_{\text{д.м}}$ — длина дуги материала в м.

Это позволяет рассчитать средний коэффициент теплообмена между футеровкой и окружающей с ней средой, относящийся к тепловому потоку $Q_{\text{ф.м}}^*$.

Коэффициент теплообмена между газовым потоком и футеровкой

$$\alpha_{z\text{ф}} = \frac{Q_{\text{ф.м}}^*}{(t_g - t_{\text{ф}}) l_{\text{д.ф}}}. \quad (19)$$

Коэффициент теплообмена между футеровкой и материалом

$$\alpha_{\text{ф.м}} = \frac{Q_{\text{ф.м}}^*}{(t_{\text{ф}} - t_m) l_{\text{д.м}}}. \quad (20)$$

Средний коэффициент теплообмена

$$\alpha_{\text{ф}} = \frac{\alpha_{z\text{ф}} \cdot l_{\text{д.ф}} + \alpha_{\text{ф.м}} \cdot l_{\text{д.м}}}{l_{\text{д.ф}} + l_{\text{д.м}}}. \quad (21)$$

Далее представляется возможность в качестве второго приближения уточнить то количество тепла, которое в течение каждого оборота печи воспринимается футеровкой от газового потока, а затем отдается ею при соприкосновении с материалом. Эта

задача решается методом гармонического анализа, позволяющим представить периодическую кривую, выражающую закон изменения температуры среды, граничащей с футеровкой, как сумму нескольких синусоид и косинусоид. Подобное разложение кривой в ряд может быть осуществлено с любой степенью точности. В результате получаем выражение:

$$Q_{\text{ф.м}}^* = \sqrt{\frac{\lambda_{\text{ф}} C_{\text{ф}} \gamma_{\text{ф}}}{\tau_0}} J (t_g - t_m) \times \\ \times (l_{\text{д.ф}} + l_{\text{д.м}}), \quad (22)$$

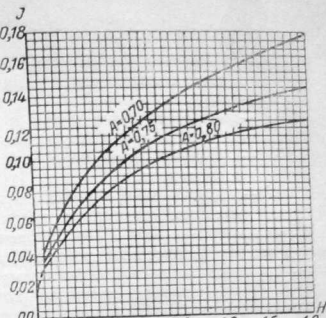


Рис. 112. Зависимость интеграла J от критериев A и H

в котором величина J является функцией двух критериев:

$$H = \frac{\alpha_{\text{ф}}^2 \tau_0}{\lambda_{\text{ф}} C_{\text{ф}} \gamma_{\text{ф}}} \quad (23)$$

и

$$A = \frac{l_{\text{д.ф}}}{l_{\text{д.ф}} + l_{\text{д.м}}}. \quad (24)$$

Эта зависимость показана на графике Е. И. Ходорова (рис. 112).

В уравнениях (19) — (24):

- t_g — температура газового потока в град.;
- $t_{\text{ф}}$ — температура футеровки в град.;
- t_m — температура материала в град.;
- $l_{\text{д.ф}}$ — длина дуги футеровки в м;
- $l_{\text{д.м}}$ — длина дуги материала в м;
- $\lambda_{\text{ф}}$ — теплопроводность футеровки в кал/м град час;
- $C_{\text{ф}}$ — теплоемкость футеровки в кал/кг град;
- $\gamma_{\text{ф}}$ — удельный вес футеровки в кг/м³;
- τ_0 — длительность оборота печи в час.;
- $\alpha_{\text{ф}}$ — коэффициент теплообмена между футеровкой и граничащей с ней средой в кал/м² град час.

В пепной зоне вращающейся печи, в дополнение к указанным видам теплопередачи, имеет место передача тепла от газового потока к пепям, выражаемая уравнением:

$$Q_u = \alpha_u (t_g - t_m) F_u, \quad (25)$$

в котором на основании опытных данных Е. И. Ходорова и П. М. Димент суммарный коэффициент теплоотдачи к пепям

$$\alpha_{\text{н}} = 14,2 W_0^{0,7} (1 + 0,00056 t_{\text{ср}}) \frac{150 + w_{\text{к}}}{100 - w_{\text{к}}}, \quad (20)$$

где: $Q_{\text{н}}$ —количество тепла, отдаваемое газovým потоком по-
пям, в кал/м час;

$F_{\text{н}}$ —поверхность печей на одном м длины печи в м²;

$\alpha_{\text{н}}$ —коэффициент теплоотдачи к пепам в кал/м² град час;

$t_{\text{ср}}$ —среднее из температур газа и материала в град;

$w_{\text{к}}$ —влажность материала при выходе из пепной зоны
в процентах.

W_0 —скорость газов в полости части печи, отнесенная к нор-
мальным условиям, в м/сек.

Приведенный в главе III метод расчета теплообмена предпола-
гает наличие постоянства температуры материала по сечению
печи, что может иметь место только при некоторой скорости вра-
щения. В этом случае материал воспринимает максимальное
количество тепла. Если скорость вращения печи ниже определен-
ного значения, то температура на поверхностях материала, сопри-
касающихся с газами и футеровкой, выше, чем в его толще, и коли-
чество получаемого материалом тепла меньше максимального.
Это обстоятельство учитывается путем введения в расчет коэффи-
циента равномерности температуры материала, представляющего
собой отношение фактически передаваемого материалу количества
тепла к максимально возможному.

Количество тепла, которое воспринимает частица материала
в течение одного периода нагрева на футеровке или на поверхности
слоя материала, является функцией двух критериев Bi и Fo .
[уравнения (43) и (44) главы III].

Количество же тепла, получаемое частицей материала на про-
тяжении одного диаметра печи, может быть приближенно пред-
ставлено как произведение из количества тепла, получаемого
в течение одного периода нагрева, на соответствующее число
периодов нагрева.

В соответствии с принятой схемой движения частиц материала
во вращающейся печи представляется возможность установить
зависимость величины коэффициента равномерности температуры
материала от критериев $Fo \cdot Bi^2$ и Bi . Эта зависимость для случая
обратно пропорционального изменения длительности и числа
периодов нагрева представлена на графике Е. И. Ходорова
и Е. Н. Червина (рис. 113).

Горение топлива.

Топливо сжигают непосредственно во вращающейся печи,
причем зона окончательного обжига материала располагается
в пределах зоны горения. Длина зоны обжига, пропорцио-
нальная длине зоны горения, и скорость движения материала
в печи должны обеспечивать необходимую длительность пре-
бывания его при температуре обжига.

Если необходимая
длительность обжига
материала, наклон и
число оборотов печей
изменяются в относи-
тельно узких пределах,
то, в соответствии с фор-
мулой (8), длина зоны
обжига и, следовательно,
длина зоны горения
должны быть прибли-
зительно пропорцио-
нальны диаметру печи.
Объем же зон обжига
и горения будет про-
порционален кубу диа-
метра печи.

Длина зоны горения
может быть выражена следующей формулой:

$$L_{\text{з}} = W_{\text{з}} \tau_{\text{з}}, \quad (27)$$

где: $W_{\text{з}}$ —скорость газов в зоне горения в м/сек;

$\tau_{\text{з}}$ —полное время горения топлива в сек.

При незначительных изменениях степени дисперсности сжи-
гаемого топлива и температуры горения, ввиду подобия гидро-
динамического процесса во вращающихся печах, полное время
горения топлива можно считать приблизительно постоянным.

Для того, чтобы длина зоны горения изменялась прямо про-
порционально диаметру печи, таким же образом должна изме-
няться скорость газов в зоне горения [формула (27)]. Тогда
тепловая мощность печи (количество тепла, выделяемого в еди-
ницу времени) будет пропорциональна кубу диаметра печи,
а тепловое напряжение зоны горения (количество тепла, выде-
ляемого в единицу времени в единице объема зоны горения)
должно оставаться постоянным.

Опытные данные подтверждают изложенные теоретические
соображения. Если выразить тепловую мощность вращающихся
печей в млн. кал/час, то по А. Н. Иванову она в среднем состав-
ляет приблизительно:

$$Q = 1,1 \cdot D^3. \quad (28)$$

Приняв в соответствии с изложенным тепловое напряжение
зоны горения постоянным и равным 300 000 кал/м³ час, получаем
для длины зоны горения приближенное выражение:

$$L_{\text{з}} = 4,9 \cdot D, \quad (29)$$

где D —внутренний диаметр печи в м.

При определенном диаметре печи и заданной тепловой мощ-
ности укорочение или удлинение зоны горения связано с повы-
шением или понижением ее теплового напряжения и темпера-

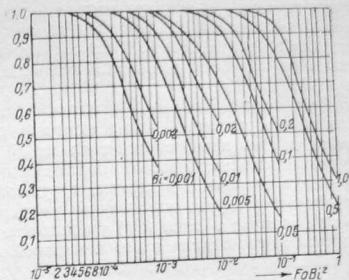


Рис. 113. Зависимость коэффициента равномерности температуры материала от критериев Bi и $FoBi^2$.

туры горения. Изменение тепловой мощности печи при сохранении постоянной температуры горения также требует соответствующего регулирования длины зоны горения путем воздействия на скорость движения и время горения топлива [формула (27)].

При определенном виде топлива факторами, с помощью которых можно увеличить длину зоны горения, являются: а) уменьшение степени дисперсности топлива, б) понижение температуры и уменьшение количества первичного воздуха, замедляющее смещение топлива с воздухом, в) увеличение скорости выхода первичного воздуха, вызывающее возрастание скорости движения частиц топлива в печи и г) уменьшение количества вторичного форсуночного воздуха и его начальной скорости по отношению к начальной скорости первичного воздуха. Минимальная протяженность зоны горения имеет место при противоположных условиях.

Основной предпосылкой регулирования длины и положения зоны горения с помощью перечисленных факторов является обеспечение полноты сгорания топлива путем поддержания необходимого избытка воздуха и достаточной температуры в зоне горения. Последняя достигается, в первую очередь, за счет нагрузки печи материалом в строгом соответствии с количеством тешла, которое может быть ему передано.

При сжигании во вращающейся печи угольной пыли длительность периода ее подсушки и поджога зависит от условий теплообмена в подготовительной зоне факела. Длительность этого периода составляет приблизительно от 0,03 до 0,05 сек. Она уменьшается с понижением влажности угольной пыли, сокращением количества первичного воздуха и его подогревом. Длительность периода выделения и горения летучих имеет порядок 0,01—0,03 сек. Следовательно, основная часть пылеугольного факела состоит из горящих частиц кокса различной величины, длительность горения которых в среднем находится в пределах 0,2—0,4 сек.

В кинетической области скорость горения коксовых частиц не лимитируется условиями подвода кислорода к их поверхности. Время горения при прочих равных условиях изменяется приблизительно обратно пропорционально квадрату температуры и пропорционально размеру частиц. Вид топлива существенно не только относительно горения. В данном случае имеет значение но и реакционная способность кокса и кокса в топливе, геологического возраста, угли с большим содержанием летучих при температуре больше 1240° горят медленнее, чем «старые» угли. В диффузионной области, где скорость горения ограничивается скоростью подвода кислорода к поверхности частиц, время горения изменяется приблизительно прямо пропорционально квадрату размера частиц и обратно пропорционально квадратному

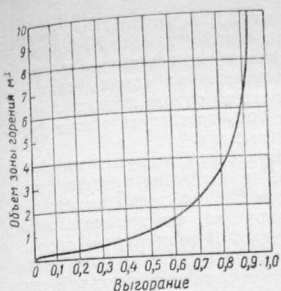


Рис. 114. Зависимость степени выгорания угольной пыли от объема зоны горения.

недожог топлива, сопровождающийся черной окраской выходящего из трубы дыма.

При сжигании во вращающихся печах угольной пыли наиболее распространенные получили одноканальные форсунки. Их недостатком является ограниченная возможность регулировки положения и длины факела, так как, например, увеличение расхода воздуха через форсунку вызывает, с одной стороны, отдаление а с другой — концентрацию зоны горения. С этой точки зрения двухканальная форсунка, в которой по центральному каналу подается аэрозоль, а по периферийному кольцевому каналу — вторичный воздух, имеет несомненные преимущества. Изменяя общий расход воздуха через форсунку и перераспределяя его между двумя каналами, можно воздействовать на длину и положение факела. Например, удлинение и удаление факела требуют уменьшения общего расхода воздуха через форсунку, увеличения скорости первичного воздуха и уменьшения отношения скорости вторичного воздуха к скорости первичного. Двухканальная форсунка изображена на рис. 115. Наилучшими, с точки зрения возможности регулирования длины и положения зоны горения, являются выдвинные одноканальные форсунки. В этом случае легко согласовать необходимое изменение положения и длины зоны горения.

Тонкость помола угля определяется содержанием в нем летучих веществ, а также зольностью, с возрастанием которой увели-

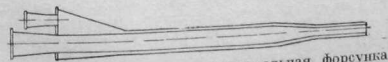


Рис. 115. Двухканальная пылеугольная форсунка для вращающихся печей.

Появление химического недожога, нехарактерного для горения угольной пыли, следует приписывать неполному сгоранию кокса или восстановлению CO_2 и H_2O при недостатке воздуха.

Для незаконченного процесса горения угольной пыли весьма характерен механический недожог, как прямое следствие недостаточной длины зоны горения. Рис. 114 наглядно показывает, как сокращение длины и, следовательно, объема зоны горения в результате, например, перегрузки печи материалом вызывает механический

Характеристика вращающихся печей без внутренних устройств

№ п/п	Наименование	Размерность	Печь 3,0×51,3 м	Печь 3,5/3,0×60 м
1	Производительность при сухом способе производства цемента	т/час	10,0	12,0
2	Удельный расход тепла при сухом способе производства цемента	кал/кг	1600	1600
3	Диаметр расширенной части	м	3,0	3,5
4	Диаметр основной части	»	—	3,0
5	Длина расширенной части	»	—	9,5
6	Длина основной части	»	51,3	50,4
7	Отношение длины к внутреннему диаметру	—	20	22
8	Внутренняя поверхность	м ²	424	509
9	Толщина корпуса	мм	20,0	22,0
10	Число опор	—	4	4
11	Наклон	%	3	3
12	Число оборотов	об/мин.	0,5—1,0	0,5—1,0
13	Мощность мотора	квт	59,0	75,0
14	Тип холодильника	—	барабанный	барабанный
15	Вес металлических частей, включая холодильник	т	303	325

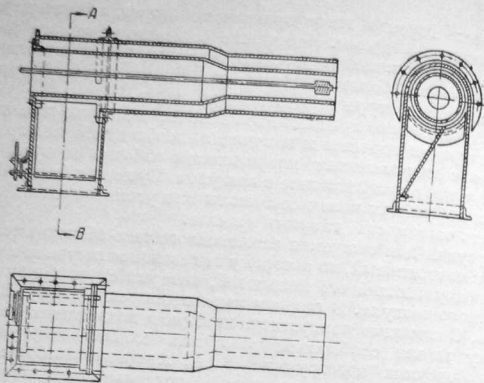


Рис. 117. Газовая форсунка для вращающихся печей.

Вращающиеся печи без дополнительных устройств

В дореволюционной России отсутствовало специальное машиностроение для цементной промышленности. Организация в СССР производства вращающихся печей относится к годам первой Сталинской пятилетки. Создателями первых отечественных вращающихся печей являются творцы наших отечественных вращающихся печей без внутренних устройств В. Н. Юнг и др. Сконструированные в тот период вращающиеся печи без внутренних устройств 3,0×51,3 м и 3,5/3,0×60 м, характеристика которых приведена в табл. 23, выпускаются и теперь.

Размеры вращающихся печей принято характеризовать произведением диаметра на длину. Если печь имеет расширенные зоны, ее диаметр выражают в виде дроби, в числителе которой стоит диаметр расширенных зон, а в знаменателе—диаметр остальной части печи.

Вращающаяся печь 3,0×51,3 м изображена на рис. 118. Печь 3,5/3,0×60 м имеет аналогичную конструкцию. Отдельные звенья корпуса печи длиной 7,2 м склепаны. На корпус печи закреплены четыре стальных бандажа шириной 350 мм, опирающиеся соответственно на четыре пары стальных роликов. Расстояние между бандажами в холодном состоянии печи составляет 14,4 м.

Каждый опорный бандаж свободно лежит на двадцати четырех литых чугуновых бандажах, присоединенных к корпусу печи болтами. Для восприятия теплового расширения печи в радиаль-

ном направлении между бандажами и бандажом оставлен зазор до 2 мм, который вывернется с помощью прокладок между бандажами и корпусом печи.

Подшипники опорных роликов снабжены водяным охлаждением и связаны общей фундаментной плитой для обеспечения совпадения их осей. Расстояние между каждой парой роликов регулируется натяжными болтами (рис. 119).

Печь приводится во вращение от мотора с помощью редуктора и венцовой пары шестерен. Стальная венцовая шестерня состоит из двух частей. К корпусу печи она прикреплена с помощью пластинчатых пружин, воспринимающих радиальное термическое

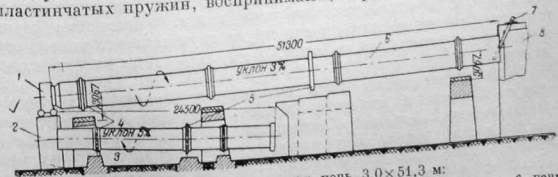


Рис. 118. Вращающаяся печь 3,0×51,3 м.

1—головка; 2—горничная камера; 3—холодильник; 4—бандажи; 5—шестерни; 6—печь; 7—тема; 8—холодная камера.

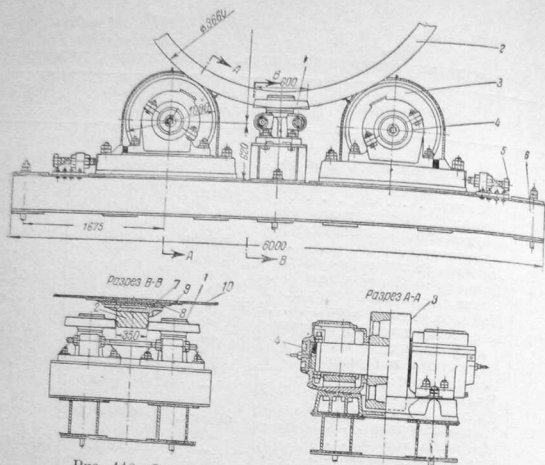


Рис. 113. Опора вращающейся печи 3,0×51,3 м:

1—упорный ролик; 2—бандаж; 3—опорный ролик; 4—подшипник опорного ролика; 5—натяжной болт; 6—фундаментная плита; 7—бандаж; 8—прокладки; 9—накладная; 10—корпус печи.

расширение печи. Привод печи, смонтированный на фундаментной плите, помещается на второй опоре, считая от холодного конца печи (см. рис. 118). На этой же опоре, во избежание перемещения печи вдоль своей оси, с обеих сторон бандажа установлены упорные ролики, вращающиеся на вертикальных осях (см. рис. 119).

В холодном конце печи имеется кольцо диаметром в свету 1,7 м, препятствующее пересыпанию подаваемого в печь материала через ее торцовое сечение. Холодный конец печи с пылесадительной камерой. В месте сопряжения печи с пылесадительной камерой установлено уплотнение, имеющее существенное значение для хорошей тяги и особенно при использовании тепла отходящих из печи газов. Уплотнение осуществляется путем трения друг о друга двух точечных колец, одно из которых укреплено на печи, а другое—на пылесадительной камере.

К горячему кону печи присоединен чугунный усеченный конус, благодаря которому диаметр выходного сечения печи уменьшен до 2,3 м, что обеспечивает создание необходимой толщину слоя материала. Печь имеет отдельный вращающийся открытый холодильник. Сопряжение печи и холодильника осуществляется с помощью откатной головки и так называемой горячей камеры. Место соединения вращающейся печи и неподвижной

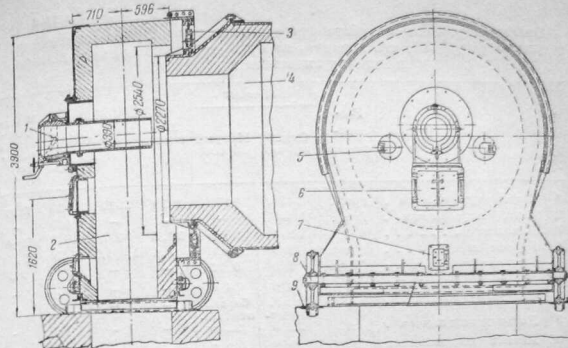


Рис. 120. Откатная головка вращающейся печи 3,0×51,3 м:

1—форсушка; 2—головка; 3—уплотнение; 4—глядялка; 5—двиг; 6—двух; 7—двух; 8—колесо; 9—резьба.

откатной головки снабжено уплотнительным устройством, во избежание присоса наружного воздуха, ухудшающего охлаждение материала и подогрев воздуха в холодильнике. На фронте головки имеются отверстия для топливной форсунки и смотровые, а также люк для удаления из печи крупных комьев обжигаемого материала (рис. 120).

Горячая камера представляет собой кирпичную шахту, в нижней части которой установлен в горизонтальном положении полуцилиндрический чугунный футерованный лоток, входящий непосредственно в холодильник. Материал сыпается в холодильник по поверхности слоя, расположенного на лотке под углом естественного откоса.

В табл. 24 приведены опытные данные о работе вращающихся печей без внутренних устройств для обжига цемента, извести, высококаменного шамота и металлургического магнетита.

Вращающиеся печи с цеями, в создании которых принимали участие А. Н. Боков, В. Ф. Гладков, И. А. Зимин, П. Ф. Лопухов, К. В. Никул, Е. И. Ходоров и др., выпускаются четырьмя размерами: 2,5/2,2×75 м; 3,0/2,7×125 м; 3,6/3,3×150 м и 3,5×150 м. Характеристика этих печей приведена в табл. 25.

Печь 3,5×150 м, изображенная на рис. 121, является одной из наиболее совершенных современных вращающихся печей. Корпус печи склепан встык из отдельных секций с максимальной длиной 11,5 м. Секция печи, к которой крепятся рекуператоры и бандаж первой опоры, изготавливается из стального листа толщиной 50 мм. Толщина корпуса под остальными бандажами

Таблица 24
 Опытные данные о работе вращающихся печей без внутренних устройств для обжига цемента, извести, высококажженного шамота и металлургического магнезита

№№ п/п	Показатели	Размерность	Цемент		Известь	Шамот	Металлургический магнезит
			Сухой способ	Мокрый способ			
1	Температура обжига	град.	1450	1450	1300	1325	1650
2	Температура факела	град.	—	—	—	—	1450
3	Длина печи	м	52,1	65,5	37,5	35,6	46,0
4	Диаметр печи	м	3,0	3,0	2,1	1,8/1,3	2,5
5	Скорость вращения	об/мин.	1,0	0,73	—	—	2,5
6	Наклон	%	3,0	4,0	—	—	3
7	Тип холодильника	—	бараб.	бараб.	—	—	—
8	Длина холодильника	м	открыт.	открыт.	—	—	—
9	Диаметр холодильника	м	22,0	22,0	—	—	—
10	Вид топлива	—	2,2	2,2	—	—	—
11	Зольность топлива	%	пыль то- шего 50 газов 20,4	пыль кузнецк 14,32	уголь- ная пыль	уголь- ная пыль	уголь- ная пыль 10,5
12	Содержание летучих в топливе	%	19,8	22,2	—	—	27,4
13	Вязкость топлива	%	1,1	1,36	—	—	0,7
14	Тонкость помола топлива (ост. на сите 90)	%	—	16,6	—	—	13,0
15	Нижняя теплотворная способность топлива	кал/кг	—	6910	7500	7000	10500
16	Вид сырья	—	известн. шпак	извест. сланц.	—	—	—
17	Тонкость помола сырья (ост. на сите 90)	%	—	7,5	—	—	—
18	Начальная влажность материала	%	9,2	35,8	—	3	2,0
19	Расход первичного воздуха	%	—	—	—	—	19,8
20	Скорость выхода воздуха из форсунок	м/сек	—	—	—	—	13,6
21	Температура первичного воздуха	град.	19	97	—	87	50
22	Температура материала при выходе из печи	град.	—	—	600	—	1370
23	Температура отходящих из печи газов	град.	260	316	—	—	—
24	Избыток воздуха за дельмо	град.	920	500	~850	375	366
25	Разрежение за печью	мм вод. ст.	1,03	1,07	—	2,1	1,8
26	Производительность печи	кг/час	12,0	14,3	—	—	1,2
27	Удельная производительность	кг/м ² час	10450	10250	3750	3200	6100
28	Удельный расход тепла	кал/кг	24,6	18,8	19,0	19,0	20,5
29	Тепловая мощность печи	мл. ккал/час	1545	2210	2770	840	882
30	Унос	%	16,2	22,7	10,4	2,7	5,4
			15,6	4,0	—	—	10,8— 15,4

Таблица 25

Характеристика вращающихся печей с печами

№№ п/п	Наименование	Размерность	Печь			
			2,5/2,2× ×75 м	3,0/2,7× ×125 м	3,6/3,3× ×150 м	3,5× ×150 м
1	Производительность при влажности цементного шлама 40%	т/час	7,0	12,5	21,0	21,0
2	Удельный расход тепла при влажности цементного шлама 40%	кал/кг	1750	1500	1600	1600
3	Диаметр расширенной части	м	2,5	3,0	3,6	—
4	Диаметр остальной части	»	2,2	2,7	3,3	3,5
5	Длина расширенной части	»	25	83	90	—
6	Длина остальной части	»	50	42	60	150
7	Отношение длины к внутреннему диаметру	—	40	50	48	48
8	Внутренняя поверхность	м ²	450	942	1471	1471
9	Толщина корпуса	мм	22	20	18	30 и 22
10	Число опор	—	4	7	8	3,5
11	Наклон	%	0,5—1,0	0,75—1,1	0,5—1,0	0,67—1,35
12	Число оборотов	об/мин.	72	125	180	250
13	Мощность мотора	квт	колосни- ковый	рекупе- ратор- ный	рекупе- ратор- ный	рекупе- ратор- ный
14	Тип холодильника	—	—	—	—	—
15	Вес металлических частей, включая холодильник	т	318	755	1100	1200
16	Система навески печей	гирлян- ды	и сво- бодные концы	и сво- бодные концы	сво- бодные концы	гирлян- ды
17	Длина зоны навески печей	м	20,1	28,8	40,0	35,0
18	Диаметр цепи	мм	16	—	26	16 и 23
19	Длина одного конца цепи	м	4	—	2,4	4,8
20	Поверхность печей	м ²	535	750	1320	1120
21	Вес печей	т	14,4	25,5	84	40,3
22	Отношение поверхности печей к поверхности футеровки в цепной зоне	—	4,28	3,35	3,67	3,1
23	Количество испаряемой воды при высущивании шлама от 40 до 10%	кг/м ² печей	11,6	15,0	15,1	16,7

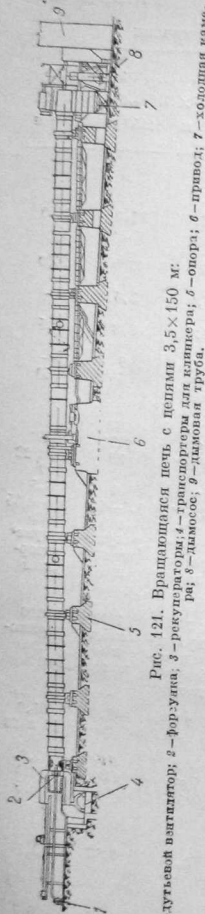


Рис. 121. Вращающаяся печь, с цепями 3,5×150 мм:
1—дугевый вальцовый; 2—фор-улик; 3—рекуператоры; 4—приспособление для загрузки;
5—дмассе; 6—пыловая труба; 7—холодная камера; 8—опора; 9—привод;

равна 40 мм. В пролетах между опорами к корпусу печи приварены кольца жесткости. Вблизи третьей и шестой опор, считая от горячего конца печи, устроены люки, предназначенные для подачи и удаления футеровочного кирпича. В холодном конце печи имеется несколько лючков для отбора проб материала.

Корпус печи посредством приклепанных к нему пластин упирается в выступы бандажей. Зазор между бандажом и корпусом допускает термическое расширение корпуса печи в радиальном направлении.

Стальная венцовая шестерня состоит из двух частей и установлена на горизонтальных пружинах, которые приклепаны к кольцам на корпусе печи.

Подшипники опорных роликов имеют жидкую смазку, автоматически подаваемую на трущиеся поверхности опрокидывающимися черпаками. Сферические самоуставляющиеся вкладыши подшипников снабжены водяным охлаждением.

Привод печи связан с резервным двигателем внутреннего сгорания, мощность которого рассчитана на вращение печи со скоростью 1 об/час. Для остановки печи в любом положении между мотором и редуктором имеется электромагнитный тормоз.

Горячий конец печи закрыт откатной крышкой, подвешенной на специальной тележке и прижатой к концу печи натяжным устройством.

Уплотнение холодного конца печи осуществляется с помощью двух прижимающихся друг к другу пружинами колец, одно из которых укреплено на печи, а другое на пылесадительной камере.

В холодном конце печи установлено подпорное кольцо, с диаметром в свету 2,1 м. Футеровка печи перед выходом клинкера в рекуператоры образует порог высотой 600 мм.

Применяются две системы навески цепей: 1) гирляндами за два конца и 2) свободными концами.

Навеска цепей гирляндами, будучи более эффективной в теплотехническом отношении, имеет некоторые эксплуатационные недостатки. Если один конец гирлянды оторвется, то цепь переpleтается с соседними цепями. При креплении к уголкам, которые деформируются под действием температуры, цепи застревают между футеровкой и уголками. Индивидуальное крепление цепей за один конец с этой точки зрения лучше. Оптимальная длина цепи при подвеске за один конец составляет 0,6 диаметра печи в свету.

Для достижения эффективной теплопередачи не следует применять коридорную систему навески цепей: в смежных сечениях цепи надо располагать в шахматном порядке.

При выходе из цепной зоны сырьевой материал должен содержать еще 5—10% воды, чтобы цепи не подвергались действию слишком высокой температуры (не больше 700°) и во избежание чрезмерного уноса. Этим соображением определяется длина цепной зоны. Плотность навески цепей по сечению должна быть такой, чтобы не препятствовать движению материала. По мере уменьшения текучести шлама нужно менее густо располагать цепи. Наиболее густо цепи могут быть расположены у входа в печь, где шлам обладает текучестью, и со стороны зоны обжига, где он уже достаточно высох. Цепи разбивают комья материала, что способствует его сушке, а также препятствуют образованию на футеровке колец из подсушиваемого материала.

Опытные данные о работе вращающихся печей с цепями в цементной промышленности при мокром способе производства приведены в табл. 26. Гидравлическое сопротивление, оказываемое цепями, составляет около 80% всего сопротивления вращающейся печи. Сопротивление цепей на 1 м длины печи характеризуется следующими цифрами:

- 1) коридорная навеска свободно висящими концами 0,6—0,8 мм вод. ст.;
 - 2) навеска свободно висящими концами по винтовой линии 0,8—2,0 мм вод. ст.;
 - 3) навеска гирляндами по винтовой линии 2,0—2,8 мм вод. ст.
- Защита корпуса вращающейся печи от действия высокой температуры осуществляется с помощью футеровки. В той части цепной зоны работающих по мокрому способу вращающихся печей, где господствует более низкая температура (до 400—600°) и в значительных количествах присутствует влага, хорошей и в значительных количествах обладает клинкерный бетон. Футеровка (около двух лет) обладает клинкерный бетон. Футеровка из шамота в этой части печи сравнительно быстро изнашивается.

В части цепной зоны с более высокой температурой, вследствие дегидратации $\text{Ca}(\text{OH})_2$, бетон постепенно теряет свою прочность и сравнительно легко истирается цепями. Здесь, вплоть до зоны спекания, в печах, работающих как по мокрому, так и по сухому способу, шамотная футеровка держится хорошо в течение нескольких лет.

Опытные данные о работе вращающихся печей с цепями для обжига цементного клинкера при мокром способе производства

Таблица 26

№ п/п.	Показатели	Размерность	Таблица 26	
			I	II
1	Длина печи	м	107	93,0
2	Диаметр печи	м	3,6/36 3,3/71	2,85/21,0 2,55/72,0
3	Общая длина цепей	м	3000	1750
4	Скорость вращения	об/мин.	0,923	0,9
5	Наклон печи	%	4	4,1
6	Тип холодильника	—	рекуператорный	рекуператорный
7	Длина холодильника	м	6,0	4,9
8	Диаметр холодильника	м	1,35	1,05
9	Вид топлива	—	тощ. уголь 60 газ.	мазут
10	Зольность топлива	%	15,24	—
11	Содержание летучих в топливе	%	19,8	—
12	Влажность топлива	%	0,36	—
13	Тонкость помола топлива (ост. на сите 90)	%	11,2	—
14	Низшая теплотворная способность топлива	кал/кг	6728	9419
15	Вид сырья	—	известн. глина	мергель
16	Тонкость помола сырья (ост. на сите 90)	%	7,2	8,7
17	Влажность сырья	%	40,5	41,4
18	Количество первичного воздуха	%	34,33	—
19	Температура выходящего клинкера	град.	212	209
20	Температура отходящих газов	град.	373	267
21	Коэффициент избытка воздуха	—	1,07	1,05

Продолжение таб. 26

№ п/п.	Показатели	Размерность	Продолжение таб. 26	
			I	II
22	Разрежение за печью	мм вод. ст.	62	74,0
23	Производительность печи	кг/час	18 100	109 00
24	Удельная производительность	кг/м ² час	18,0	16,6
25	Удельный расход тепла	кал/кг или	1787	1676
26	Тепловая мощность	млн. ккал/час	32,34	18,27
27	Унос возвратный	%	6,2	—
28	Унос безвозвратный	%		—

Для футеровки зоны спекания применяется хромомagneзитовый, магнезитовый или высокоглиноземистый кирпич. При нормальных условиях эксплуатации срок службы этих огнеупоров достигает одного года. Используются также тальковый камень и клинкерно-бетонный кирпич, значение которых уменьшается по мере развития производства высокоогнеупорных футеровочных материалов. Срок службы клинкерно-бетонного кирпича колеблется от трех недель до четырех месяцев в лучшем случае. Стойкость талькового кирпича также не превышает четырех месяцев.

Зону охлаждения вращающихся печей футеруют высокоосновным шамотным кирпичом с хорошей термостойкостью. Глиноземистые кирпичи обладают высокой огнеупорностью и механической прочностью, умеренным теплопроводностью и термическим расширением, однако они не могут в полной мере противостоять химическому воздействию обжигаемого материала и восстановительной газовой среды. В тех случаях, когда сырье образует обмазку и работает хорошо.

Наоборот, магнезитовые огнеупоры отличаются большой химической сопротивляемостью, но обладают высокой теплопроводностью и большим коэффициентом термического расширения. Поэтому при использовании этих огнеупоров необходимо создавать на футеровке защитную обмазку из материала или применять термоизоляцию из легковесного шамота или кисельгура толщиной 30—50 мм. Термоизоляция дает экономию 4—5% топлива.

Результаты испытания вращающейся печи $3,0 \times 51,3$ м с котлом-утилизатором 755 м² для обжига цементного клинкера по сухому способу

№ п/п.	Показатели	Размерность	Величины
1	Вид топлива		Уголь. Сучанский 45 Артемовский 55
2	Зольность топлива	%	23,07
3	Содержание летучих в топливе	»	39,9
4	Влажность топлива	»	4,68
5	Тонкость помола топлива (ост. на сите 200/90)	»	0,98/5,44
6	Низшая теплотворная способность топлива	кал/кг	5281
7	Тонкость помола сырья (ост. на сите 200/90)	%	1,0/9,4
8	Влажность сырья	»	16,57
9	Температура выходящего клинкера	град.	118
10	Температура газов за печью	—	700
11	Коэффициент избытка воздуха за печью	—	1,08
12	Разрежение за печью	мм вод. ст.	7,2
13	Температура газов перед котлом	град.	650
14	Коэффициент избытка воздуха перед котлом	—	1,43
15	Температура газов за котлом	град.	174
16	Коэффициент избытка воздуха за котлом	—	2,08
17	Разрежение за котлом	мм вод. ст.	58,1
18	Давление пара	ати	19,6
19	Температура перегретого пара	град.	305
20	Температура питательной воды	»	169
21	Температура воды после зномайзера	»	10050
22	Производительность печи	кг/час	23,7
23	Удельная производительность печи	кг/м ² час	8200
24	Производительность котла	кг/час	9,5
25	Удельная производительность котла	кг/м ² час	0,815
26	Выход пара на 1 кг клинкера	кг	1748
27	Общий удельный расход тепла	кал/кг клин	1102
28	Удельный расход тепла на обжиг клинкера	кал/кг клин	646
29	Удельный расход тепла на производство пара	кал/кг клин млн кал/час	17,58
30	Тепловая мощность печи		

Укладка кирпичей должна производиться с устройством эластичных швов таким образом, чтобы тепловое расширение поглощалось в пределах самой кладки. С этой целью между кирпичами прокладывают пластинки из листового или волнистого железа, которые со стороны, обращенной внутрь печи, частично выгорают, или применяется специальный вяжущий раствор из магнезита и растворимого стекла.

Для подачи шлама во вращающиеся печи при мокром способе производства используется ковшевой питатель с постоянным уровнем шлама и регулируемым числом оборотов. При сухом способе производства обычно применяется шнековый двоянный питатель с регулируемым числом оборотов. В этом случае после питателя устанавливается смесительный шнек или барабан, в которых вследствие увлажнения и перемешивания происходит грануляция сырьевой смеси.

Для подачи угольной пыли во вращающиеся печи также используют двоянные шнековые питатели с регулируемым числом оборотов. Угольная пыль подается в трубопровод, идущий от вентилятора, и вместе с первичным воздухом транспортируется в печь.

В качестве пылеосадительных устройств для очистки от пыли отходящих из вращающихся печей газов применяются камеры, циклоны и электрофильтры. К. п. д. камер не превышает 30%; для циклонов и мультициклонов он составляет соответственно 60—70% и 80—90%, для электрофильтров же значение к.п.д. повышается до 95%.

Вращающиеся печи с устройствами для использования тепла отходящих газов

Попытки использовать отходящие из вращающихся печей газы для сушки сырья не дали положительных результатов, вследствие значительного усложнения производства и увеличения пылеобразования в сушильных барабанах.

Тепло газов, отходящих из коротких вращающихся печей при сухом способе производства, т. е. при достаточно высокой температуре отходящих газов, используется для получения пара в котлах-утилизаторах, позволяющего обеспечить производство собственной электроэнергии.

В табл. 27 приведены результаты испытания вращающейся печи $3,0 \times 51,3$ м для обжига цементного клинкера по сухому способу с котлом-утилизатором (755 м²).

При работе описанной установки на несмоченной водой сырьевой смеси производительность печи увеличилась до 12 т/час, а производительность котла до 10 т/час.

Установка котлов-утилизаторов за короткими вращающимися печами при мокром способе производства, как показала практика, оправдывает себя только в случае предварительной фильтрации

шлама, приближающей режим работы печи к условиям сухого способа производства.

Назначение фильтров заключается в механическом удалении части воды из шлама перед его подачей во вращающуюся печь. Таким образом, уменьшается удельный расход тепла на обжиг на 10—20% и повышается производительность печи на 15—30%. Эффективность фильтрации в основном зависит от свойств сырьевых материалов. При фильтрации шлама из кристаллических сырьевых материалов содержание воды в нем легко

снизить до 18—20%. Удельная производительность фильтра составляет около 200 кг/м² час. С приближением структуры сырьевых материалов к коллоидальной, т. е. с увеличением их растворимости в воде, возрастает количество воды, остающейся в шламе при фильтрации, и удельная производительность фильтра становится ниже 100 кг/м² час. В этих случаях установка фильтров становится нерентабельной.

Применение котлов-утилизаторов и устройств для фильтрации шлама вызывает усложнение производства. Недостатки соединения вращающихся печей с котлами-утилизаторами и шламовыми фильтрами привели в более позднее время к развитию способов использования отходящих из печей газов для термической обработки сырья, поступающего в эти же печи.

Одним из таких способов является разбрызгивание шлама, при котором последний под давлением 6—8 атм подается центробежным насосом в печь через форсунки в тонкораспыленном состоянии, чтобы увеличить поверхность соприкосновения между газами и материалом.

Вследствие малого времени пребывания капель во взвешенном состоянии и ограничения тонкости распыла возрастанием уноса, эффективность разбрызгивания шлама в чистом виде относительно невелика. Она существенно увеличивается при комбинировании разбрызгивания шлама с навеской печей в зоне подсушки вращающихся печей. При вращении печи форсунки полностью обдувают цепи шламом последовательно ряд за рядом.

Разбрызгивание шлама на коротких вращающихся печах дает в среднем повышение производительности на 10% и экономию 5% топлива. Однако величина уноса при разбрызгивании шлама находится в пределах 10—20%. Несмотря на очистку шлама, засорение форсунок происходит довольно часто, что отрицательно сказывается на надежности установки.

Вращающиеся печи с испарителями, в создании которых принимали участие В. Ф. Гладков, И. А. Зимин, Е. И. Ходоров и др., значительно более надежны в работе, чем печи с установками для разбрызгивания шлама.

Испаритель печи 2,0×25 м (рис. 122) представляет собою горизонтальный цилиндрический барабан диаметром 2,7 м и длиной 1,5 м, который закрыт с торцов глухими стальными днищами, отлитыми вместе с полыми пафмами. Испаритель печи 2,2×35 м имеет диаметр 2,7 м и длину 2,2 м. Боковая поверхность барабана образована стальными колосниковыми плитами. Ширина отверстий в колосниковых плитах составляет 70 мм. Испаритель наполовину заполнен стальными кольцами диаметром 120 мм, высотой 150 мм и толщиной 15 мм. Общий вес колец составляет 5,75 т. Расход колец равен 110 г/т клинкера. Поверхность теплообменных тел на 1 кг клинкера суточной производительности составляет около 400 см². Если коэффициент заполнения испарителя меньше 0,5, то снижается степень использования тепло-

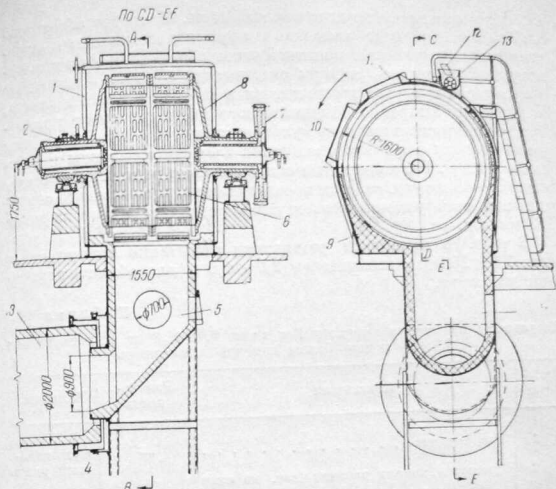


Рис. 122. Испаритель 2,7×1,5 м к вращающейся печи 2,0×25,0 м:
1—конус; 2—подшипник; 3—печь; 4—уплотняющее устройство; 5—соединительная камера; 6—колосниковый барабан; 7—шестерня; 8—длина с цапфой; 9—фортуна; 10—люк; 11—патрубок к дымоходу; 12—жолоб питания; 13—распределитель шлама.

содержания газов, если же она больше 0,6, то уменьшается интенсивность движения теплообменных тел, необходимого для удаления с их поверхности засохшего шлама.

Барабан испарителя вращается со скоростью 1—2 об/мин. Он пафмах в подшипниках, снабженных водяным охлаждением. Он заключен в неподвижный металлический кожух, соединенный с металлической переходной камерой, наклонное дно которой служит лотком для подачи высушенного материала из испарителя в печь. Нижняя половина кожуха испарителя и переходная камера футерованы огнеупорным кирпичом. Место сопряжения печи с переходной камерой снабжено уплотнительным устройством. Кожух испарителя соединяется через муфты с эксгаустером.

Шлам ковшовым питателем подается в распределитель, представляющий собой корыто с шестью солами, расположенными над испарителем по его длине. Через отверстия в колосниковых плитах шлам поступает на заполняющие испаритель металлические кольца, а в противоположном направлении эксгаустером про-

сымаются отходящие из печи горячие газы. Частично обезвоженный материал в виде комочков и кружки просыпается в открытый колосниковых плит в нижней части испарителя и по наклонному дну переходной камеры скатывается в печь. Удовольствие в мультициклоном унос возвращается в печь при помощи шнека. Прямые батареи циклонов малого диаметра имеет преимущество перед использованием мультициклона, так как в последнем узкие проходы для газов в спиральях элементов склонны к забиванию пылью. Гидравлическое сопротивление испарителей составляет 35—60 мм вод. ст. Для преодоления гидравлического сопротивления всей установки эксгаустер развивает напор порядка 150 мм вод. ст.

В табл. 28 приведены результаты испытания вращающейся печи 2,0 × 25,0 м с испарителем 2,7 × 1,5 м для обжига цементного клинкера.

Таблица 28

Результаты испытания вращающейся печи 2,0 × 25,0 м с испарителем 2,7 × 1,5 м для обжига цементного клинкера

№№ п/п	Показатели	Размерность	Величины
1	Вид топлива	—	Суджентийский уголь
2	Тонкость помола топлива (ост. на сите 200/90)	—	5314
3	Низшая теплотворная способность топлива	%	0,45/24,4
4	Влажность сырья	кал/кг	5314
5	Температура выходящего клинкера	%	38,57
6	Температура газов за печью	град.	60
7	Коэффициент избытка воздуха за печью	»	70,9
8	Разрежение за печью	—	1,05
9	Температура газов за испарителем	мм вод. ст.	3,1
10	Коэффициент избытка воздуха за испарителем	град.	205
11	Разрежение за испарителем	—	1,473
12	Разрежение за мультициклоном	мм вод. ст.	23,8
13	Влажность материала из испарителя	» » »	42,8
14	Температура материала из испарителя	%	12,7
15	Производительность печи	град.	94,0
16	Удельная производительность печи	кг/час	2540
17	Удельный расход топлива	кг/м ² час	20,3
18	Тепловая мощность	кал/кг клин.	1720
19	Унос возвратный	млн	4,37
20	Унос безвозвратный	кал/час	8,3
		%	3,2

Из испарителя в печь поступает материал в виде комочков, подсушенных до влажности 10—12% при температуре около 100°. В результате этого удельная производительность вращающихся печей с испарителями на 25—30% выше, чем обычных вращающихся печей.

Печь с испарителем также значительно лучше приспособлена к форсировке, так как возрастание температуры и скорости газов в испарителе вызывает интенсификацию теплопередачи в нем без существенного увеличения удельного расхода тепла на обжиг. Недостатком этой установки является значительный унос (до 14% от веса сырья). Однако этот недостаток преодолевается путем применения эффективных пылеулавливающих аппаратов и возврата уноса в печь.

Высечение подготовительных стадий процесса обжига вяжущих материалов, протекающих при температурах ниже 1000°, из полой вращающейся печи в отдельный агрегат, который обеспечивал бы достаточно развитую поверхность соприкосновения отходящих газов с подготавливаемым к окончательному обжигу в печи материалом, значительно интенсифицирует теплопередачу конвекцией. В качестве такого агрегата при мокром способе производства используется описанный выше испаритель. Устройство аналогичного назначения при сухом способе производства носит название кальцинатора и представляет собой бесконечную колосниковую решетку, транспортирующую в печь гранулированное сырье, через слой которого сверху вниз просасываются эксгаустером отходящие из печи газы с температурой около 1000°.

Среди действующих вращающихся печей с конвейерными кальцинаторами наиболее типичной является установка, состоящая из печи 3,2 × 32 м, решетки 3,0 × 11,0 м, гранулятора 2,6 × 5,0 м и холодильника 2,7 × 18,5 м.

Сырьевая мука из бункера питательным шнеком подается в элеватор, проходит просеивающий шнек и через секторный питатель поступает в гранулятор. Последний представляет собой барабан, вращающийся на двух барабанах со скоростью 11—18 об/мин. На протяжении, примерно, первых двух третей длины гранулятора в него подается вода. Диаметр отверстий в орбитальных трубах составляет 1,2—1,5 мм. Каждая водная ситильная трубка образует ядро гранулы, которая при вращении барабана каilla образует ядро гранулы, которая при вращении барабана увеличивается в размерах за счет налипания новых порций материала. Для удаления образующихся на внутренней поверхности гранулятора наслоений сырьевой смеси через него по всей длине пропущен скребок. Способность сырьевой муки к грануляции зависит от тонкости ее помола. При достаточно тонком помоле (менее 10% остатка на сите № 90) хорошо гранулируется сырьевая мука даже из непластичных материалов: известняка и пылевидного песка, шлама или золы.

Гранулы размером 5—20 мм с влажностью 12—15% сымаются из гранулятора в воронку, которая распределяет их по всей ширине колосниковой решетки. Чем однороднее по размерам гранулы, тем меньше гидравлическое сопротивление оказывает слой материала на решетке, тем успешнее работает печь. Высота слоя гранул регулируется в пределах 140—180 мм шибром, установленным на выходе из воронки.

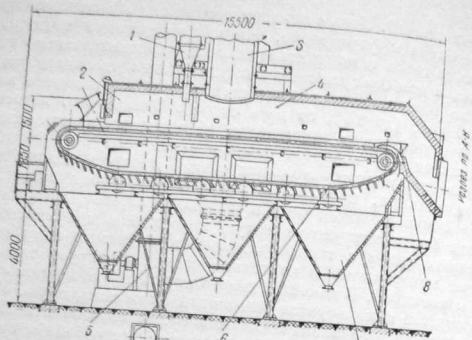


Рис. 123. Конвейерный кальцинатор 3,0×11,0 м вращающейся печи 3,2×32,0 м:

1—камера для разбавления газов; 2—камера подсушки; 3—труба для розжига;
4—камера кальцинирования; 5—дымосос; 6—колосниковая решетка; 7—бушлер для
пирола; 8—переходной лоток.

Колосниковая решетка (рис. 123) заключена в плотный металлический кожух. Пространство над решеткой разделено поперечной стенкой на две камеры. Первая камера служит для преднагрева гранул при быстром нагреве вследствие бурного испарения воды гранул могут разрушиться. Для получения столь низкой температуры горячие газы из второй камеры через присоединенную к ней дымовую трубу, служащую для розжига печи, перепутываются в другую трубу, соединенную с первой камерой; в эту же трубу засасывается воздух для разбавления газов. Количество перепускаемого газа и засасываемого воздуха регулируется с помощью задвижек.

Несущей конструкцией колосниковой решетки являются несколько бесконечных цепей, звенья которых отлиты из стали. Между цепями шарнирно подвешены чугунные колосниковые плиты с прорезями 6,5×100 мм. Цепи натянута на звездочки. Вал приводных звездочек в горячем конце решетки снабжен водяным охлаждением. Уплотнение между движущейся решеткой и неподвижным кожухом осуществляется с помощью пластин из хромированной стали, которые сидят на осях колосниковых плит и пружинами прижимаются к выступам, устроенным с обеих сторон над решеткой по всей ее длине и снабженным направляющими также из хромированной стали. Скорость движения решетки составляет 25—50 м/час.

Частично кальцинированный материал передается с решетки в печь при помощи переходного лотка. Необходимо предотвратить разламывание лепешки материала, пока она находится на лотке. Это достигается тем, что поверхности колосников и лотка приобретает небольшая кривизна, причем лоток прижимается к решетке в том месте, где она начинает изменять направление движения.

Отходящие газы с температурой 100—110° отсасываются из подколосникового пространства эксгаустером, присоединенным к герметично охватывающему колосниковую решетку кожуху. Гидравлическое сопротивление конвейерных кальцинаторов колеблется в пределах 60—100 мм вод. ст. В нижней своей части кожух снабжен воронками, направляющими проваливающийся через решетку материал на цепной транспортер, который подает его в элеватор сырьевой смеси. Количество провала через решетку достигает 5% от расхода сухого сырья.

Вращающаяся печь с конвейерным кальцинатором потребляет, примерно, на 50% меньше топлива, чем обычная вращающаяся печь. Соответственно меньше количество воздуха, которое может быть использовано для охлаждения материала, и выше температура подогрета воздуха. Поэтому вращающиеся печи с конвейерным кальцинатором характеризуются повышенной температурой горения, ухудшающей условия работы футеровки. Холодильник этих печей должен быть больше, чем у обычных вращающихся печей, причем следует уделять особое внимание оборудованию его внутренними устройствами, способствующими теплообмену. С целью использования максимального количества воздуха для охлаждения материала, количество первичного воздуха, служащего для подачи в печь угольной пыли, в установках с конвейерными кальцинаторами сокращается до 15% общего расхода воздуха. Это вызывает необходимость в повышенном давлении воздуха. Кроме того, места сопряжения печи и холодильника с горюстью. Этих мест должно быть больше, чем у обычных вращающихся печей камерой должны быть снабжены хорошими уплотнениями.

Вращающиеся печи с конвейерными кальцинаторами увеличивают форсировку в широких пределах вследствие наличия резерва чения удельного расхода тепла, вследствие наличия колосниковой эффективной дополнительной передачи тепла на колосниковую

вой решетке. При обжиге цементного клинкера эти печи по сравнению с другими вращающимися печами обладают максимальной удельной производительностью и минимальным удельным расходом тепла. Удельная производительность конвейерного кальцинатора составляет 380 кг/м² час. Вследствие удельной пыли при прохождении газов через колосниковую решетку, величина уноса материала из установки находится в пределах 1,5—3% от расхода сырья. Гранулированный материал при движении через печь сохраняет свою форму, что благоприятствует теплопередаче. Недостатком этих печей является сложность конструкции, вызывающая повышенную стоимость ремонта и требующая более квалифицированного обслуживания.

В табл. 29 приведены результаты испытания вращающейся печи 3,2 × 32,0 м с конвейерным кальцинатором 3,0 × 11,0 м для обжига цементного клинкера.

Таблица 29

Результаты испытания вращающейся печи 3,2 × 32,0 м с конвейерным кальцинатором 3,0 × 11,0 м для обжига цементного клинкера

№ п.п.	Показатели	Размерность	Величины
1	Вид топлива	—	уголь
2	Зольность топлива	—	12—18
3	Содержание летучих в топливе	»	24—27
4	Влажность топлива	»	1—1,5
5	Точность помола топлива (ост. на сите 200/90)	»	—7,10
6	Низшая теплотворная способность топлива	кал/кг	6000—6500
7	Точность помола сырья (ост. на сите 200/90)	»	1/4, 0
8	Влажность сырья	»	11
9	Диаметр гранул	мм	4—15
10	Высота слоя гранул на решетке	»	160—170
11	Температура газов над решеткой в I камере	град.	300—340
12	» » в II камере	»	903—980
13	Температура газов перед эстакастером	»	110
14	Разрежение над решеткой в I камере	мм вод. ст	8—20
15	» » в II камере	»	5—10
16	» » под решеткой	» »	60—30
17	Количество первичного воздуха	»	25
18	Температура выходящего воздуха	град.	150—200
19	Производительность печи	кг/час	12 500
20	Удельная производительность печи	кг/м ² час	44,5
21	Удельный расход тепла	кал/кг клин	1100
22	Тепловая мощность печи	млн. кал/час	13,5

Холодильники вращающихся печей

Максимально полное использование теплосодержания материала, выходящего из вращающихся печей, имеет весьма существенное значение как с точки зрения экономии топлива, так и для достижения необходимого пиromетрического эффекта горения.

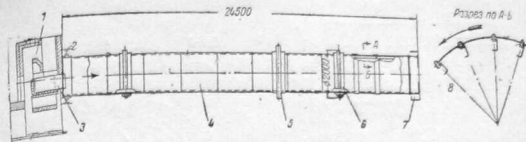


Рис. 124. Барабанный холодильник 2,5 × 24,5 м для вращающихся печей 3,0 × 51,3 м и 3,5/3,0 × 60,0 м:
1—горячая камера; 2—успокоитель; 3—лоток; 4—холодильник; 5—шестерня; 6—баран; 7—сито; 8—швеллер.

Барабанный холодильник

Барабанный холодильник 2,5 × 24,5 м вращающихся печей 3,0 × 51,3 м и 3,5/3,0 × 60,0 м изображен на рис. 124. Толщина корпуса холодильника равна 16 мм. Он установлен на двух опорах с уклоном 5% и приводится во вращение со скоростью 5 об/мин. от мотора мощностью 29,5 квт. На протяжении 10 м от горячего конца холодильник футерован износостойчивым термостойким шамотным кирпичом толщиной 120—150 мм, срок службы которого составляет 1—2 года. Далее на протяжении 13,5 м к внутренней поверхности холодильника присоединены пересыпающие полки из швеллера железа № 16 длиной 1,4 м каждая. По окружности барабана имеется 12 полок, причем в смежных рядах полки расположены в шахматном порядке.

Тепловое напряжение 1 м² внутренней поверхности барабанных холодильников приближенно выражается формулой:

$$\frac{Q}{F} = 12000 W^{0,6} \text{ кал/м}^2 \text{ час град.} \quad (30)$$

где W — скорость воздуха в холодильнике в м³/м² сек.

Рекуператорный холодильник

Рекуператорный холодильник печи 3,5 × 150 м (рис. 125) состоит из десяти сварных рекуператоров диаметром 1,35 м и длиной 6,0 м, изготовленных из стальных листов толщиной 10 мм. С горячего конца печи присоединяется на заклепках торцовый лист с 10 углублениями, образующими опоры для рекуператоров с 10 углублениями, образующими опоры для рекуператоров. Рекуператоры крепятся хомутами к торцовому листу и болтами к стальным горловинам, прикрепленным к корпусу печи.

Внутри горловины устанавливаются сменные патрубки из жароупорного чугуна. Во избежание попадания в рекуператоры крупных кусков клинкера патрубки на входе имеют решетки. С внутренней стороны печи поверхность вокруг патрубков защищена сменными броневыми плитками из жароупорного чугуна. На длине 2,5 м, считая от горячего конца, рекуператор имеет

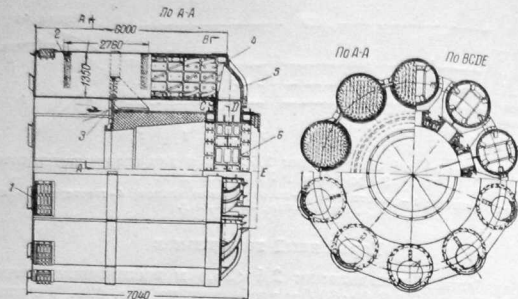


Рис. 125. Рекуператорный холодильник 1,35 × 6,0 м × 10 мм вращающейся печи 3,5 × 150 м:

1—выходная решетка; 2—печи; 3—торцовый лист; 4—броневые плиты с пересыпными лопастями; 5—течка; 6—входная решетка.

броневые плиты и пересыпные лопасти из жароупорного чугуна. Броневые плиты крепятся к корпусу рекуператоров болтами. Далее, на длине 2,76 м навешены за один конец цепи. Выходное отверстие на боковой поверхности рекуператоров закрыто решеткой, пропускающей только мелкие куски материала. Крупные куски выходят из рекуператоров через центральное отверстие в торцовой диафрагме.

Вращающиеся печи 3,0/2,7 × 125 м и 3,6/3,3 × 150 м также имеют рекуператорные холодильники.

Тепловое напряжение 1 м² внутренней поверхности рекуператорных холодильников приблизительно выражается формулой:

$$\frac{Q}{F} = 19\,000 W_0^{0.6} \text{ кал/м}^2 \text{ час град.}, \quad (31)$$

где W_0 —скорость воздуха в рекуператорах в м³/м² сек.

Скребокый колосниковый холодильник

Вращающиеся печи: 2,5/2,2 × 75; 2,0 × 25,0 и 2,2 × 35,0 м имеют скребокый колосниковый холодильник, составляющие одно целое с печью.

На рис. 126 изображен холодильник печи 2,0 × 25,0 м. Как видно из рисунка, к корпусу печи в ее горячем конце болтами присоединено кольцо из жароупорного чугуна диаметром 2 м и длиной 0,8 м, в котором диаметрально противоположно друг другу расположены четыре отверстия 0,5 × 0,4 м для выхода клинкера. В эти отверстия вставлены на болтах решетки, сделанные также из жароупорного чугуна. Назначение решеток заклю-

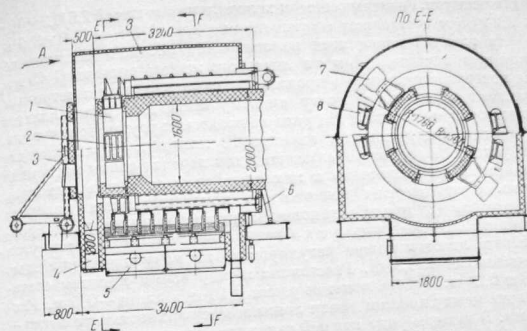


Рис. 126. Скребокый колосниковый холодильник 1,8 × 2,4 м, составляющий одно целое с печью 2,0 × 25,0 м:

1—чугунное кольцо; 2—решетка; 3—откатная головка; 4—приемник для крупных кусков; 5—удаление; 7—доплата; 8—ковы; 9—ковух хвостовой; 6—новодушная камера; 10—отверстие для форсунок; 11—глазеть; 12—заяк; 13—футеровка; 14—клинкерная течка.

чается в том, чтобы в холодильник не попадали крупные куски материала, которые через обрез чугуного кольца сваливаются в снабженный затвором специальный приемник, откуда периодически удаляются.

Просыпающийся в щели материал поступает на колосниковую решетку, смонтированную concentрически по отношению к печи и параллельно ее оси. Длина колосниковой решетки составляет 2,4 м, а ширина 1,8 м. Расстояние между колосниками равно 10 мм, причем живое сечение составляет примерно 25% пло-

щадя решетки. Размеры решеток холодильников печей $2,5 \times 2,2 \times 75$ м и $2,2 \times 35$ м составляют соответственно $2,5 \times 4,2$ м и $2,0 \times 3,6$ м.

На горячий конец печи concentрично насажен цилиндрический кожух длиной 2,6 м из листового железа толщиной 10 мм. На поверхности кожуха в продольном направлении диаметрально противоположно друг другу смонтированы два ряда лопаток из жароупорной стали и два ряда ковшей из жароупорного чугуна. В каждом ряду лопаток имеется 10 лопаток, установленных под углом 8° к оси печи и служащих для передвижения материала по колосниковой решетке к находящейся в ее конце выходной точке. Предусмотрена возможность изменения угла поворота лопаток на 12° путем установки клиньев между ними и крестштейнами. В холодильниках большой производительности угол поворота лопаток можно регулировать на ходу печи помощью специального привода. Расстояние между осями лопаток составляет 0,26 м. Высота лопатки равна 0,45 м, а длина—0,5 м. Расстояние между нижним краем лопатки и поверхностью решетки—50 мм. В каждом ряду ковшей находятся три ковша размерами $0,6 \times 0,55 \times 0,18$ м каждый; расстояние между нижним краем ковша и поверхностью решетки—0,26 м. Назначение ковшей состоит в выравнивании слоя материала на решетке после прохождения лопаток и поддержанию, таким образом, постоянной его высоты.

Колосниковая решетка, лопатки и ковши заключены в неподвижный железный кожух, к которому с фронта печи примыкает откатная головка с смонтированной топливной форсункой и глэдками. На противоположной стенке кожуха холодильника, через которую проходит печь с надетым на нее цилиндром, для крепления лопаток и ковшей, имеется уплотнительное устройство. С внутренней стороны фронтальной стенки кожуха и вертикальная часть боковых стенок футерованы, задняя же торцовая стена и верхняя полцилиндрическая часть кожуха не футерованы. Воздух проходит через слой материала на решетке, охлаждая его и нагреваясь, в кожух холодильника, где он перемешивается и затем поступает в печь для горения.

Переталкивающий колосниковый холодильник

Переталкивающий колосниковый холодильник $1,2 \times 3,8$ м, номинальной производительностью 4,5 т/час, изображен на рис. 127. Холодильник представляет собой ступенчатую решетку, в которой чередуются неподвижные ступени, заделанные в стены камеры, с подвижными ступенями, связанными общей рамой. Рама совершает возвратно-поступательное движение от эксцентрикового привода. Решетка установлена под углом 15° и заключена в металлический кожух прямоугольного сечения, собранный на болтах из отдельных секций, которые сварены из листовой стали. Изнутри кожух футерован огнеупорным кирпичом толщиной 250 мм.

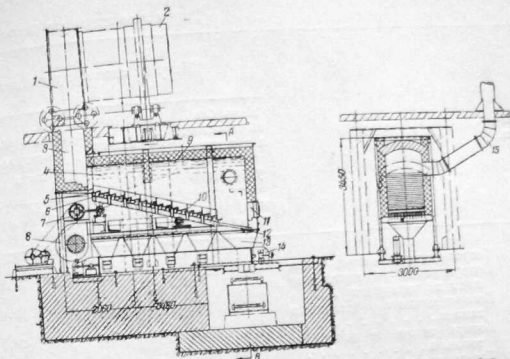


Рис. 127. Переталкивающий колосниковый холодильник $1,2 \times 3,8$ м:
1—головка; 2—печь; 3—вертикальная камера; 4—горячая камера; 5—подвижные ступени; 6—используемые ступени; 7—эксцентриковый привод; 8—вентилатор; 9—бушера для холодной камеры; 10—подвижная рама; 11—люк; 12—решетка; 13—бушера для провала; 14—транспортёр для провала; 15—труба для отвода воздуха.

Тележка с подвижными колосниковыми плитами делает от 8 до 16 движений в минуту. Величина ее хода составляет 60 мм и поддается регулировке. Привод тележки осуществляется от электромотора постоянной тока мощностью 1,6 квт. В зависимости от числа оборотов мотора изменяется толщина слоя материала на решетке в пределах до 200 мм.

Камеры холодильника под и над решеткой разделены на две части. Подача воздуха в обе секции под решеткой осуществляется с производительностью № 5 среднего давления с производительностью 15 000 м³/час и напором 200 мм вод. ст. Привод вентилятора — от мотора мощностью 17 квт, 1450 об/мин. Наличие двух камер позволяет подавать через верхнюю часть решетки чистый воздух, необходимое для горения топлива в печи, количество воздуха, необходимое для горения полного охлаждения материала, избыточное количество воздуха (около 50%), который с температурой $140-150^\circ$ отводится в атмосферу.

**

Гидравлическое сопротивление колосниковых холодильников лежит в пределах 60—100 мм вод. ст. Удельная производительность их составляет около 500 кг/м² час.

Тепловой коэффициент полезного действия колосниковых холодильников равен 90—95%, против 65—70% у барабанных и реку-

Расчетные тепловые балансы

№ п/п	Статьи	Мокрый способ производства					
		Печь без внутренних и дополнительных устройств		Печь с печами		Печь с разбригаживанием	
		кал/кг кл	%	кал/кг кл	%	кал/кг кл	%
1	Теоретический расход тепла	400	19,3	400	23,4	400	21,2
2	Потери тепла на испарение воды из материала	615	29,7	615	36,0	615	32,6
3	Потери тепла с отходящими газами	673	32,6	191	17,0	374	19,8
4	Потери тепла от недожога топлива	62	3,0	51	3,0	56	3,0
5	Потери тепла с уносом	63	3,0	47	2,7	201	10,7
6	Потери тепла с материалом	50	2,4	50	2,9	50	2,7
7	Потери тепла в окружающую среду	207	10,0	255	15,0	189	10,0
8	Расход тепла на образование пара	—	—	—	—	—	—
9	Общий расход тепла	2070	100,0	1610	100,0	1885	100,0
10	Тепловой к. п. д.	—	19,3	—	23,4	—	21,2

ператорных холодильников. Скорость охлаждения клинкера в них значительно больше, что связано с улучшением качества цемента и уменьшением стоимости его размола.

Основы расчета вращающихся печей

При конструировании вращающейся печи ее часовая производительность является заданной. Удельный расход тепла на обжиг определяется из теплового баланса на основании принятых значений температуры отходящих газов и других исходных величин.

В табл. 30 приведены расчетные тепловые балансы основных типов вращающихся печей.

Производство из величин производительности печи и удельного расхода тепла представляет тепловую мощность печи. По формуле (28) находят диаметр зоны горения, который по конструктивным соображениям определяет диаметр остальных частей печи. Затем проверяют скорости газов в печи, так как если скорость превышает 5—6 м/сек чрезмерно возрастает унос материала из печи.

Таблица 30

вращающихся печей

цемент		Сухой способ производства цемента								Производство шамота	
Печь с испарителем		Печь с фильтрами и котлом-утилизатором		Печь без внутренних и дополнительных устройств		Печь с котлом-утилизатором		Печь с конвейерным кальцинаторм		Полая печь	
кал/кг кл	%	кал/кг кл	%	кал/кг кл	%	кал/кг кл	%	кал/кг кл	%	кал/кг кл	%
400	23,1	400	20,4	400	24,4	400	21,9	400	41,0	200	22,6
615	35,6	230	11,7	162	9,9	162	8,9	138	14,1	140	15,8
303	17,5	292	15,0	644	39,2	268	14,6	112	11,5	285,0	32,3
52	3,0	59	3,0	49	3,0	55	3,0	29	3,0	—	—
135	7,9	53	2,7	89	5,5	40	2,2	7,0	0,7	62,7	7,0
50	2,9	50	2,5	50	3,0	50	2,7	75	7,7	12,3	1,4
173	10,0	295	15,0	246	15,0	275	15,0	214	22,0	185,0	20,9
—	—	580	29,7	—	—	580	31,7	—	—	—	—
1730	100,0	1960	100,0	1640	100,0	1830	100,0	975	100,0	885,0	100,0
—	23,1	—	50,1	—	24,4	—	53,6	—	41,0	—	22,6

Длина зоны спекания пропорциональна длине зоны горения [формула (29)], и необходимое время пребывания материала в этой зоне обжига определяют скорость движения материала, а также скорость движения материала, принимая по конструктивным соображениям высоту подпорожного устройства в горячем конце печи, по формуле (12) определяют произведение из наклона на число оборотов печи. Руководствуясь соображениями о влиянии скорости вращения печи на теплопередачу (рис. 113), выбирают оптимальное число оборотов и находят таким образом наклон печи.

Скорость движения материала и производительность печи в соответствии с уравнением (14) обуславливают коэффициент заполнения печи материалом и, следовательно, высоту подпорожного устройства в холодном конце печи, которая должна превышать на 100—200 мм стрелку сегмента, занятого материалом в поперечном сечении печи.

Длина печи за исключением длины зоны обжига и зоны охлаждения определяется из расчета теплопередачи. В этой основной части печи материалу должно быть передано количество

тепла, необходимое для доведения его до максимальной температуры обжига за вычетом тепла экзотермических реакций.

Процесс нагревания материала до максимальной температуры обжига делится на характерные стадии. Каждой стадии температуры соответствует определенный участок печи, длина которого находится из расчета теплопередачи. Температура материала на границах каждого участка известна, а следовательно, известны, и те физико-химические превращения, которые должны происходить в его пределах. Из тепловых балансов участков определяется температура газового потока на их границах. Для участка, примыкающего к зоне обжига температура газового потока принимается равной теоретической температуре горения, умноженной на пирометрический коэффициент полезного действия печи.

В первом приближении, задавая величину потери тепла в окружающую среду $Q_{\text{ст}}$, подбором из уравнений (16), (18), (31), (32) и (35) можно определить температуру футеровки $T_{\text{ф}}$, а затем по уравнению (18) количество тепла, отдаваемое закрытой футеровкой материалу. Затем по формуле (22) и рис. 112 это количество тепла уточняется и из уравнения (16) вторично определяется значение температуры футеровки $T_{\text{ф}}$.

Прежде чем из уравнения (17) определить длину отдельных участков печи, его члены $Q_{\text{ст}m}^m$, $Q_{\text{ст}m}^m$ и $Q_{\text{ф}m}^m$ должны быть умножены на коэффициент равномерности температуры материала для процесса нагревания на поверхности слоя, а член $Q_{\text{ф}m}^m$ — на соответствующий коэффициент для процесса нагревания на футеровке. Эти коэффициенты определяются по рис. 113.

Расход воздуха и выход отходящих газов в единицу времени определяются на основании значения тепловой мощности печи. Задавая относительным количеством первичного воздуха, находят производительность дутьевого вентилятора. Его напор и напор эксгаустера, в случае искусственной тяги, определяются из расчета гидравлического сопротивления соответственно воздухопровода и печи. Расчет топливных форсунок осуществляют задавая скоростью выхода топлива из форсунок.

Для выбора оптимальной характеристики вращающейся печи, ее тепловой расчет производят в нескольких вариантах.

На рис. 128 для конкретного примера показано, как от изменения длины печи при постоянном диаметре (3 м) зависят:

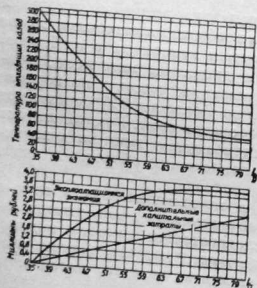


Рис. 128. Зависимость экономической эффективности вращающейся печи от ее длины при постоянном диаметре.

температура отходящих газов, эксплуатационные расходы за срок амортизации завода (30 лет) и капитальные затраты. Очевидно, что на современном этапе развития вращающихся печей увеличение отношения $\frac{L}{D}$ выше значения 50 является экономически нецелесообразным.

Рис. 129 демонстрирует возрастание удельного количества передаваемого материалу тепла с увеличением диаметра печи при прочих равных условиях.

При неизменном отношении длины печи к диаметру производительность зоны обжига возрастает пропорционально кубу диаметра печи, а производительность подготовительных зон — пропорционально их поверхности (т. е. квадрату диаметра) и увеличению удельного количества передаваемого материалу тепла. Поэтому при неизменном отношении длины печи к диаметру и увеличении последнего представляется возможность повышать степень форсирования печи, однако при этом возрастает температура отходящих газов и понижается к. п. д. печи. Для сохранения к. п. д. печи постоянным необходимо, следовательно, чтобы длина печи увеличивалась в большей степени, чем диаметр, а именно пропорционально диаметру в степени, близкой к двум.

Возрастание удельного количества передаваемого материалу тепла с увеличением коэффициента заполнения печи материалом показано на рис. 130.

Вследствие кратковременности нагрева на поверхности слоя материала температура частиц не успевает повыситься настолько, чтобы вызвать сокращение количества передаваемого им тепла, которое, таким образом, практически не зависит от числа оборотов печи.

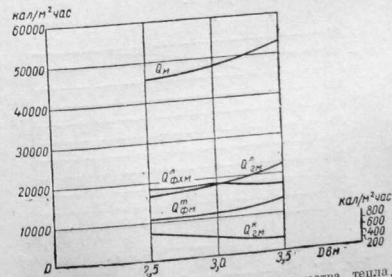


Рис. 129. Зависимость удельного количества тепла, передаваемого материалу от диаметра печи.

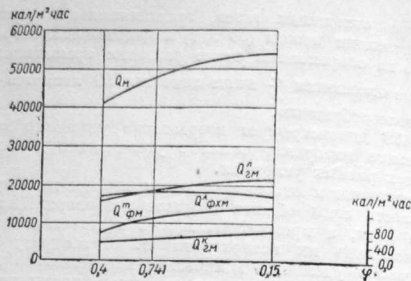


Рис. 130. Зависимость удельного количества тепла, передаваемого материалу, от коэффициента заполнения печи.

При длительном нагреве частиц на футеровке значительно повышается их температура и сокращается количество воспринятого тепла. Увеличение числа оборотов печи вызывает сокращение длительности одного периода нагрева, но увеличение числа периодов. Материал, соприкасающийся с футеровкой, чаще обновляется. Температура материала по толщине слоя выравнивается, причем увеличивается количество передаваемого тепла, вследствие повышения разности температур между футеровкой и материалом. На рис. 131 показана зависимость коэффициента равномерности температуры материала для процесса нагрева на футеровке от числа оборотов печи при изменении ее наклона обратно пропорционально числу оборотов.

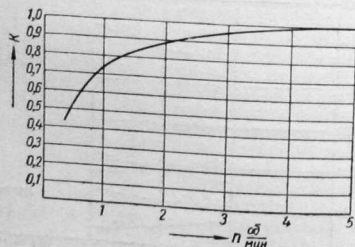


Рис. 131. Зависимость коэффициента равномерности температуры материала от числа оборотов печи.

Следует иметь в виду, что количество тепла, передаваемого материалу закрытой поверхностью футеровки, как показывают расчеты, составляет в среднем около 25% общего количества, получаемого им тепла.

Основы эксплуатации вращающихся печей

Скорость обжига вяжущих материалов во вращающихся печах в основном определяется интенсивностью процесса теплопередачи. Для увеличения поверхности теплопередачи в устаревших коротких вращающихся печах, работающих по мокрому способу производства, применяется навеска пепей. Экономия топлива достигает при этом 5—10%.

Количество навешиваемых пепей лимитируется их термостойкостью и зависит от отношения длины печи к диаметру, определяющему характер изменения температуры по длине печи. Длина пепной зоны по отношению к общей длине печи ориентировочно должна составлять:

$$\text{для печей с отношением } \frac{L}{D} > 33 \text{—} 20\%.$$

$$\text{для печей с отношением } 25 < \frac{L}{D} < 33 \text{—} 10\%.$$

В печах с отношением $\frac{L}{D} < 25$ невозможна устойчивая работа пепей.

За печами по направлению к горячему концу печи, там, где материал уже не обладает пластичностью, применяется установка крестовин из жаропрочного чугуна (рис. 132).

Навеска пепей и установка крестовин при неизменной тепловой мощности печи требует увеличения тяги.

Увеличение скорости вращения пепей также вызывает интенсификацию теплопередачи. Однако при неизменном наклоне печи вследствие сокращения коэффициента заполнения, оптимальное значение числа оборотов будет меньше, чем тогда, когда с появлением скорости вращения соответственно уменьшается наклон печи. (рис. 131). Сохранение постоянным времени пребывания материала в зоне обжига при повышении скорости вращения и неизменном наклоне печи может быть достигнуто за счет увеличения высоты подпорного кольца на выходе из печи (формула 12).

Следует стремиться к максимальному увеличению разности температур между газами и материалом в высокотемпературных зонах, где подавляющее количество тепла передается излучением. Это достигается путем понижения температуры обжига за счет добавок к материалу плавней и минерализаторов и повышения (в пределах, допускаемых нормальной стойкостью футеровки) температуры горения. Последнее имеет место при обеспечении полного сгорания calorийного, хорошо подсушенного (влажность не выше гигроскопической) топлива, с минимальным избытком

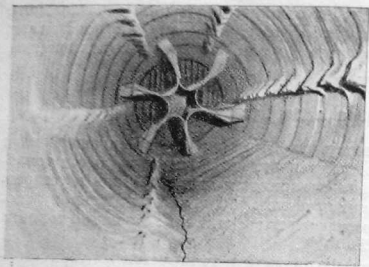


Рис. 132. Установка теплообменника во вращающейся печи.

скорость газов в холодном конце печи превышает 5—6 м/сек., то чрезмерно возрастает унос. Форсировка печи при неизменном внутреннем устройстве требует увеличения тяги примерно пропорционально квадрату тепловой мощности печи. Таким образом, тяга с известным резервом должна обеспечивать получение той производительности, которая допустима по соображениям уюса и экономичного использования тепла.

Применительно к вращающимся печам употребляют понятия о длинной или короткой зоне обжига.

Если границу между зоной обжига и зоной охлаждения удалять от головки печи дальше известного предела, это приведет к сокращению активной длины печи и поэтому нецелесообразно.

Положение границы между зоной обжига и зоной охлаждения должно обеспечивать возможность маневрирования, т. е. некоторого перемещения этой границы, если необходимо, к головке печи без ущерба для качества обжига, а также надлежащую протяженность зоны охлаждения.

При неизменной тепловой мощности печи граница между зоной обжига и подготовительными зонами будет удаляться от головки печи и зона обжига будет удлиняться с уменьшением подачи материала. При неизменной подаче материала с увеличением подвода тепла зона обжига также будет удлиняться.

При допустимом подводе тепла (степень форсировки) подача материала должна быть подобрана так, чтобы производительность зоны обжига и производительность подготовительных зон были равны, и чтобы удельный расход тепла на обжиг находился в пределах нормы. При этих условиях длина зоны обжига или положение границы между ней и подготовительными зонами будут оптимальными.

Чем меньше влажность шлама при мокром способе производ-

воздуха ($\alpha = 1,05$) и его подогревом. Факторами активного воздействия на температуру горения являются также дутье и степень дисперсности топлива.

Форсировка печей, увеличение их тепловой мощности, при прочих равных условиях, вызывают возрастание температуры отходящих газов и повышение производительности печи. Однако, когда

ства, тем меньше тепла нужно передать материалу для получения 1 кг клинкера. При прочих равных условиях сокращение влажности шлама на 1% дает повышение производительности печи примерно на 1,5% и экономию около 1% топлива. Следует использовать добавки (например, сульфителюльозный щелок), позволяющие уменьшить влажность шлама при сохранении вязкости, обеспечивающей его текучесть.

Методы работы стехановцев-обжигальщиков цементных заводов т.г. Рожкова, Козак, Трофимова, Шарбан, и др., добившихся высоких показателей на вращающихся печах, основаны именно на повышении температуры обжига, использовании длинной зоны, увеличении числа оборотов печей и т. д. Распространение этих методов работы на всю цементную промышленность должно дать существенный народнохозяйственный эффект.

Регулирование подачи сырьевой смеси во вращающиеся печи должно осуществляться в зависимости от изменения ее влажности и химического состава. Подача сырья должна быть прямо пропорциональна скорости вращения печи. Регулировать подачу топлива надо в зависимости от температурного режима печи, характеризующего температурой и положением зоны обжига, температуры отходящих газов. Регулирование подачи а также температурой отходящих газов. Регулирование подачи дутьевого воздуха следует использовать исключительно как средство влияющее на температуру в зоне горения. Подача остального воздуха определяется выдерживанием необходимого коэффициента избытка воздуха.

Перевод печи на тихий ход должен рассматриваться как крайнее средство, применяемое тогда, когда регулирование подачи топлива и воздуха не дает необходимого эффекта. Понижение разрежения в холодном конце печи свидетельствует об увеличении гидравлического сопротивления за местом измерения (забивка шильбу камеры и т. д.) или о неудовлетворительном уплотнении установок. Повышение разрежения указывает на увеличение гидравлического сопротивления перед местом измерения (образование колец, замазывание шайб и т. д.).

3. ШАХТНЫЕ ПЕЧИ

Шахтные печи могут быть разделены на две основные группы. К первой относятся печи, в которых топливо смешивается с материалом путем дослойной загрузки в печь или при брикетировании сырьевой смеси, или, наконец, путем совместного размола и брикетирования. Весь воздух, необходимый для горения топлива, подается в печь снизу дутьевым вентилятором. Отходящие газы отходятя сверху печи с помощью дымовой трубы. Топливо для этой группы печей не должно содержать значительного количества летучих веществ (антрацит, коксик), которые выделяются в бескислородной зоне и при тем-

пературе более низкой, чем температура воспламенения, благодаря чему их потенциальное тепло теряется.

Вторую группу составляют печи, снабженные выносными топками полного сгорания или полугазовыми топками, или, наконец, газогенераторами. В этих устройствах могут сжигаться различные местные виды топлива (бурые угли, сланцы, торф, дрова). Часть воздуха, необходимого для горения топлива, подается в топку или газогенератор, остальная же часть вводится в печь для охлаждения материала и сжигания горючих газов. Эти печи работают на искусственной тяге.

Недостатком шахтных печей является то, что в них трудно обеспечить равномерную загрузку, выгрузку и распределение газов по сечению, т. е. равномерность обжига, а также то, что в них невозможно наблюдать за состоянием материала в печи, дукции. Кроме того, она отличается меньшей мощностью единичного агрегата. Последнее обстоятельство связано с повышенным удельным расходом рабочей силы. Но шахтная печь имеет несомненные преимущества перед вращающейся в капитальных затратах на строительство, в частности, в расходе металла, в проценте изготовления и в суммарном удельном расходе тепла и энергии на обжиг.

Эти особенности шахтных печей обусловили их преимущественное распространение для обжига местных вяжущих и керамических материалов: извести, гипса, шамота и т. д. Шахтная печь наиболее подходит и для цементных заводов местного значения, в особенности, если есть подходящее сырье и топливо. Весьма выгоден обжиг цементного клинкера в шахтной печи, если сырьем является натуральный мергель или сланцевый кокс, близкий по составу к цементу и содержащий достаточное для обжига количество горючего. Шахтные печи целесообразно применять и в том случае, если необходимо использовать в качестве топлива антрацитовый штыб и коксик.

В процессе развития техники обжига в шахтных печах наблюдается тенденция к уменьшению размера кусков обжигаемого материала, с целью ускорения обжига. При неизменных размерах печи это требует повышения давления дутья. Однако более правильным путем заключается в уменьшении высоты печи, которое при сохранении постоянными ее диаметра и производительности позволяет уменьшить гидравлическое сопротивление печи. Если же сохранить гидравлическое сопротивление и производительность неизменными, то можно соответственно уменьшить диаметр печи, причем возрастает скорость воздуха в печи. Уменьшение диаметра печи облегчает осуществление равномерной по сечению печи загрузки и выгрузки материала, а также равномерного распределения газов. Сокращение высоты и диаметра печи, облегчающее и удешевляющее ее постройку, положено в основу конструкции малогабаритных интенсивно работающих шахтных печей.

Скорость горения газообразного топлива в шахтной печи, как и во вращающейся печи, определяется скоростью его смешения с воздухом.

При подаче воздуха под колосниковую решетку шахтной печи и газа по ее периферии условия смешения газа и воздуха являются неблагоприятными. Зона горения растягивается на значительную высоту, причем у стенок, где проходит больше воздуха, горение происходит интенсивнее, чем в центре печи.

Для достаточного хорошего обжига материала по оси печи расстояние между противоположными газовыми влетами должно быть по возможности небольшим.

При горении твердого топлива в шахтной печи высокая температура и значительный размер кусков топлива или содержащих топливо брикетов, которые можно рассматривать как многозольное топливо, определяют протекание горения в диффузионной области.

Увеличение скорости воздуха вызывает пропорциональное возрастание потребления кислорода единицей поверхности топлива. Уменьшение размера кусков топлива связано с увеличением поверхности в единице объема. Таким образом увеличение скорости воздуха и уменьшение размера кусков топлива или брикетов, а также степени дисперсности содержащегося в них топлива, приводят к увеличению теплового напряжения зоны горения и, следовательно, к повышению температуры горения, которое вызывает увеличение содержания СО в отходящих газах.

Управление процессом обжига в шахтной печи сводится к регулированию скорости выгрузки материала, давления дутья и величины тяги, обеспечивающему постоянное положение зоны горения.

Шахтные печи для обжига цементного клинкера

Процесс обжига цементного клинкера в современных шахтных печах полностью механизирован, поэтому они и получили название автоматических. Эти печи преимущественно работают по, так называемому, способу «черного брикета», при котором короткопламенное топливо размалывается и брикетуется совместно с сырьевыми материалами. Этот способ работы обеспечивает наиболее равномерное распределение топлива и его золь среди материала.

Автоматическая шахтная печь, конструкция которой разработана И. А. Зимним и др., диаметром 2,55 и высотой 11 м, изображена на рис. 133. Ее производительность при давлении дутья 700 мм вод. ст. составляет 4,1 т/час, а удельный расход тепла на обжиг 1200—1300 кал/кг клинкера. Шахта печи выложена из шамотного кирпича и заключена в металлический кожух. На протяжении 3,5 м от верхнего обреза шахты в футеровке имеется воздушный канал шириной 140 мм. Воздух подается

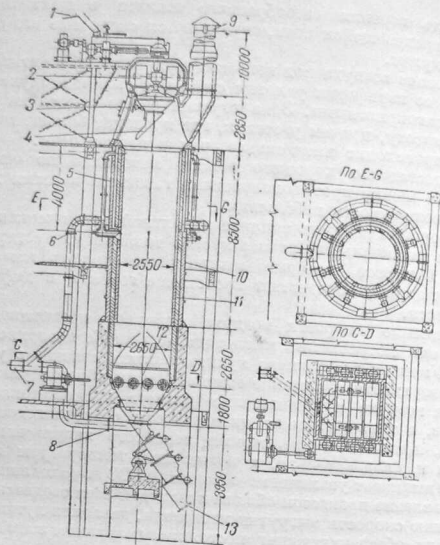


Рис. 133. Автоматическая шахтная печь 2,55×11,0 м:
 1—смесительный шнек; 2—пресс-бегуны; 3—печной колпак;
 4—распределительный желоб; 5—печной колпак;
 6—посевное дутье; 7—воздух от вентилятора;
 8—дутье под колосники; 9—дымовая труба; 10—конус печи;
 11—футеровка; 12—вальцевое разгрузочное устройство;
 13—трехшлюзовый затвор.

вентилятором под разгрузочное устройство и в нижнюю часть воздушного канала в печной футеровке. Из верхней части этого канала с помощью 8 труб диаметром 150 мм, снабженных на концах фурмами, он вводится в печь на расстоянии 4,0 м от верхнего ее обреза. При подобном разделении подачи воздуха на две зоны уменьшается гидравлическое сопротивление печи и охлаждается футеровка в зонах горения и подогрева. Распределение воздуха между двумя зонами регулируется с помощью дресселя.

В качестве загрузочного устройства служит аппарат для формовки сырьевой смеси, так называемые пресс-бегуны, которые установлены в литом печном колпаке высотой 2,85 м. К этому же колпаку присоединяют трубу диаметром 1,0 м, высотой 10,0 м. На боковой поверхности колпака имеются люки диаметром 600 мм.

Пара бегунов, заключенная в замкнутый конус, вращается на оси, сидящей на полом вертикального вала. Вал делает от 4 до 8 оборотов в минуту. При этом бегуны вращаются по дугчатому дугу, на которое подается увлажненная сырьевая смесь. Под действием бегунов сырьевая смесь продавливается через отверстия в дне бегунов и в виде цилиндриков диаметром 30 мм и длиной 50—100 мм распределительным желобом равномерно загружается по сечению печи. Распределительный желоб вращается с валом, проходящим через полый вал бегунов. Для увеличения давления прессования отверстия в дне бегунов выполнены с небольшим сужением внизу на конус (30/28 мм). Пресс-бегуны приводятся в движение мотором постоянного тока мощностью 6 квт.

Разгружают клинкер из печи с помощью четырех зубчатых вальцов диаметром 400 мм, вращающихся в каждой паре навстречу друг другу со скоростью от 0,8 до 3,2 оборотов в час. Вальцы приводятся в движение от мотора постоянного тока мощностью 8,5 квт. Клинкер выходит из печи через трехшлюзовый затвор, клапаны которого попеременно открываются и закрываются при помощи специального кулачкового механизма, приводимого от мотора мощностью 2 квт. В то время, когда один из шлюзов открыт, два других закрыты. Это предотвращает потерю воздуха из подколосникового пространства при выгрузке клинкера. Общий вес механического оборудования печи составляет 58 т.

Малогобаритная автоматическая шахтная печь высотой 6,0 и диаметром 2,0 м, конструкция которой разработана В. Ф. Гладковым, Е. И. Ходоровым и др., изображена на рис. 134. Ее производительность при давлении дутья 700 мм вод. ст. составляет 4,2 т/час, а удельный расход тепла на обжиг 1200—1300 кал/кг клинкера. Шахта печи выложена из красного и шамотного кирпича кладкой из красного кирпича и футеровкой из шамотного кирпича. В верхней части печи между и заключена в металлический конус. Шахта печи выложена из красного и шамотного кирпича кладкой из красного кирпича и футеровкой из шамотного кирпича. Шахта печи выложена из красного и шамотного кирпича кладкой из красного кирпича и футеровкой из шамотного кирпича. Шахта печи выложена из красного и шамотного кирпича кладкой из красного кирпича и футеровкой из шамотного кирпича. Шахта печи выложена из красного и шамотного кирпича кладкой из красного кирпича и футеровкой из шамотного кирпича.

В качестве аппарата для формовки и загрузки в печь сырьевой смеси служат пресс-бегуны, которые по принципу действия и конструкции не отличаются от аналогичного устройства автоматической шахтной печи 2,55×11,0 м. Бегуны приводятся от мотора мощностью 6,8 квт и вращаются со скоростью 19 об/мин. Распределительный желоб вращается со скоростью 3,8 об/мин. от мотора мощностью 0,85 квт.

Разгрузочное устройство печи представляет собой круглую вертикальную решетку диаметром 2 м, вращающуюся на вертикальном валу диаметром 280 мм со скоростью, регулируемой в пределах 0,76—3,05 об/час. Мощность приводного мотора составляет 2 квт. Поверхность решетки покрыта зубьями, предназна-

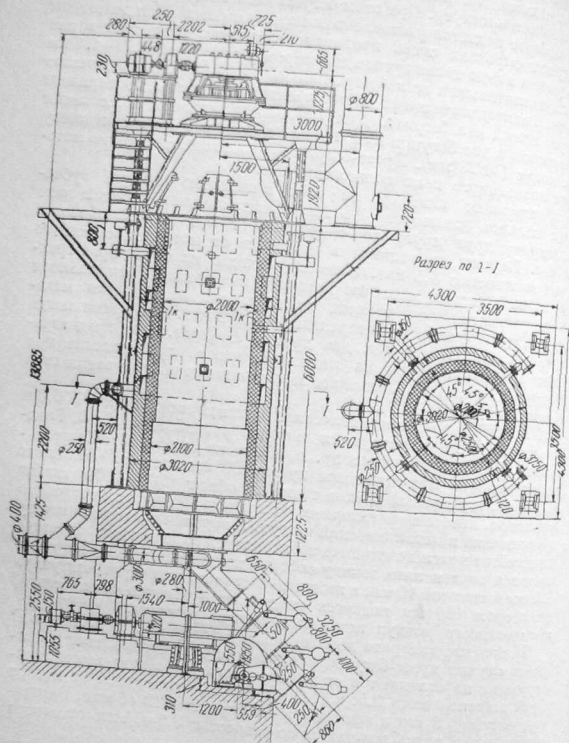


Рис. 134. Малогабаритная автоматическая шахтная печь 2×6 м.

ченными для дробления спекшейся массы клинкера. Величина зубьев увеличивается от периферии решетки к ее центру, в связи с уменьшением окружной скорости решетки в этом направлении. Проваливающийся через отверстия колосниковой решетки клинкер выходит из печи через трехшлюзовый затвор, аналогичный затвору автоматической шахтной печи 2,55×11,0 м. Общий вес механического оборудования печи равен 37 т.

Сырье, дающее непрожженный рассыпающийся в печи брикет, а также склонное к образованию приваров, мало пригодно или вовсе непригодно для обжига в шахтной печи. Привары вызывают одностороннюю осадку материала, провал материала и пролет газов через образующиеся каналы, в результате чего, наряду с обожженным клинкером, получается большое количество недопала. Возможность образования приваров уменьшается при увеличении скорости движения материала в печи и при воздушном охлаждении футеровки.

Соотношение между сырьем и топливом при обжиге цементного клинкера в шахтной печи устанавливается в процессе приготовления сырьевой смеси. Поэтому чрезвычайно существенно обеспечить точность дозировки сырья и топлива, которая достигается путем использования автоматических весов. При необходимости подогреть печь дополнительное топливо вводится в пересыпку с брикетом.

Пористость слоя материала из валюшки, благодаря однородности ее размеров больше, чем при работе на крупном брикете или гранулах. Это обеспечивает более равномерное распределение воздуха по сечению печи при меньшем гидравлическом сопротивлении, а следовательно, и более высокую производительность печи.

Опытные данные о работе автоматических шахтных печей для обжига цементного клинкера приведены в табл. 31.

Шахтные печи для обжига извести

Для обжига извести в основном применяются шахтные печи, работающие пересыпным способом на короткопламенном топливе, производительность которых достигает 6,0—6,5 т/час. Шахту печи выкладывают из красного кирпича и футеруют шамотом. Цилиндрические печи стягиваются обручами. Кладка шахт других профилей связывается каркасом.

Высота шахты этих печей (рис. 135) колеблется от 8 до 20 м, диаметр круглых шахт доходит до 3,5 м. Шахта имеет форму двух усеченных сомкнутых широких основаниями конусов или цилиндрическую, причем в последнем случае холодильники делают несколько большего диаметра, чем зону обжига. Топливо вводят в шахту или полойно, или в пересыпку с кусками известняка. Пересыпные печи особенно хорошо поддаются механизации.

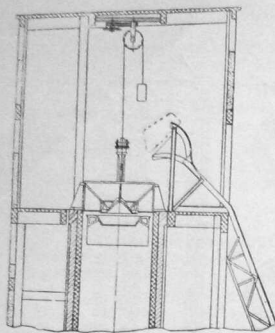


Рис. 135. Загрузочный механизм известково-обжигательных печей.

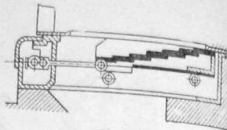
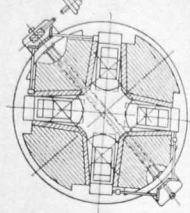


Рис. 137. Разгрузочный механизм Антонова для известково-обжигательных печей.



например, при обжиге известняка с размерами кусков 70—150 мм размеры кусков антрацита составляют 10—40 мм.

Разгрузочные механизмы известково-обжигательных шахтных печей имеют более легкую конструкцию, чем у печей для обжига цементного клинкера. Разгрузочный механизм Антонова (рис. 137) состоит из четырех кареток, которые, совершая вза-

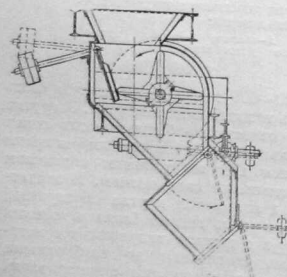


Рис. 138. Разгрузочный механизм Иссерслиса для известково-обжигательных печей.

вратно-поступательное движение, сталкивают комья обожженной извести в разгрузочный люк. Скорость движения кареток имеет четыре ступени регулировки. Разгрузочный механизм Иссерслиса (рис. 138) для комовой извести представляет собой стальные четырехлопастные звездочки (турникеты), насаженные на вал, вращающийся со скоростью 0,2—2,0 об/час. Турникеты сбрасывают комья и мелочь в разгрузочный бункер печи. Нижнюю часть шахты герметизируют, устанавливая

шлифовые затворы. В паче с периодической выгрузкой слой материала, заполняющий разгрузочный бункер, препятствует проходу воздуха; в момент выгрузки дутье выключается.

Пересыпные печи отличаются более простой конструкцией, большей удельной производительностью и меньшим расходом топлива, чем другие шахтные печи для обжига извести.

Недостатком их является загрязнение извести золой топлива, что не имеет места при полугазовом и газовом способах обжига, а также ограниченность в выборе топлива. Данные о производительности пересыпных печей и расходе топлива в них приведены в табл. 32.

Таблица 32

Удельная производительность и удельный расход тепла при обжиге различных материалов в шахтных печах

№ п/п.	Род обжигаемого материала и способ обжига	Удельная производительность в кг/м ² час	Удельный расход тепла в кал/кг
1	Штукатурный гипс	2500—3500	600—700
2	Ангидрит	—	700—900
3	Эстрих-гипс	—	700—1000
4	Известь на продуктах полного горения	200—300	1600—1800
5	Известь на полугазе	450—600	1260—1400
6	» на газе	450—600	1200—1400
7	» по пересыпному способу	650—900	840—1050
8	Шамот печи Гросса	500—600	700—1050
9	Доломит вагранки	—	1400—2800
10	» механизиров. печи	—	1400—1750
11	» печи на мазуте	1000	1400—1750

Шахтные печи с полугазовыми топками, работающими на местных видах топлива, конструкции Б. В. Ананьина, С. Н. Голубкова, А. С. Крама, М. А. Савинова и М. О. Юшкевича (рис. 139), представляют собой шахту круглого, овального или прямоугольного (с закругленными краями) сечения. Полная (строительная) высота шахты колеблется от 12 до 22 м. Топки в количестве от 2 до 6 располагаются симметрично по отношению к шахте, приблизительно на $\frac{1}{3}$ высоты шахты. Наиболее распространены шахтно-ступенчатые колосниками, имеющие в нижней части горизонтальную колосниковую решетку.

Коэффициент избытка воздуха при горении в полугазовых топках составляет 0,6—0,8. Теплотворная способность полугаза равна 500—700 кал/м³, а его теплоемкость при температуре 850—950° составляет 250—350 кал/м³. Полугаз из топок посту-

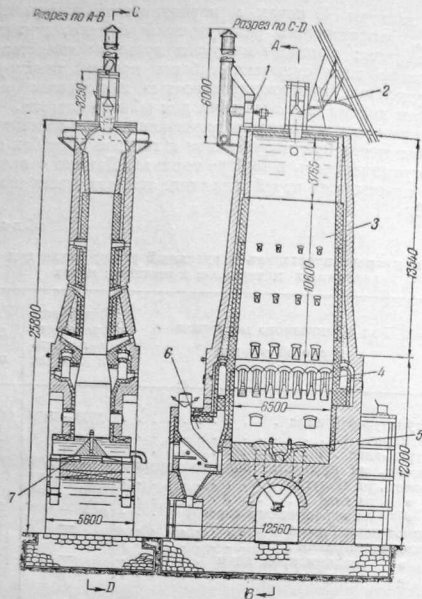


Рис. 139. Механизированная шахтная печь для обжига извести с полугазовыми топками:

1—дымосос; 2—загрузочное устройство; 3—шахта; 4—газовые влеты; 5—подвод дутья; 6—полугазовая топка; 7—разгрузочное устройство.

падает или непосредственно в печь через горловину топки, или в коллектор, соединенный с шахтой газовыми влетами. При наличии коллектора полугаз распределяется более или менее равномерно по сечению шахты, и состав его выравнивается. Отрицательными обстоятельствами являются загрязнение коллектора летучей золой и смолами. Горючие элементы полугаза догорают в шахте печи, причем температура достигает 1300° и выше. Вторичный воздух поступает через выгрузочные отверстия печи или через специальный гребень, нагреваясь до 400—500° за счет тепла материала.

При обжиге в печах с полугазовыми топками расход топлива выше, чем при пересыпном способе, так как около 10—15%

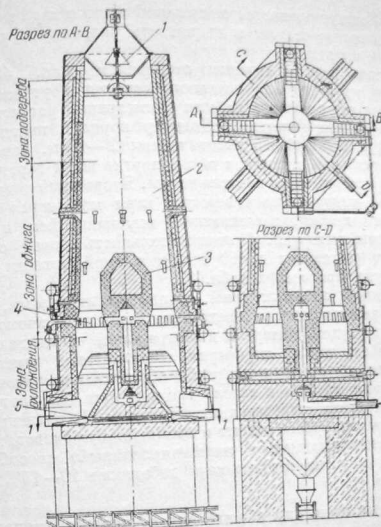


Рис. 140. Механизированная шахтная печь для обжига извести с газовым отоплением:
1—загрузочное устройство; 2—шахта; 3—влеты; 4—газовые влеты; 5—разгрузочное устройство.

общего количества тепла топлива теряется топкой. Для достижения равномерного обжига по сечению шахты и во избежание недожога центральной части столба материала, ширину или диаметр шахты делают не больше 2 м или снабжают печь керном (рис. 140). Керн представляет собой шпунтовый столб, расположенный в центре зоны охлаждения шахты. Через отверстия в керне в шахту подается воздух, проходящий по выложенному в керне вертикальному каналу. Шахта в сечении газовых влетов обычно несколько сужена. Производительность полугазовой печи составляет в зависимости от размеров зоны охлаждения производительность обжига извести в сутки; величины удельной производительности и удельного расхода тепла указаны в табл. 32.

Печи с полугазовыми топками снабжают дымососом, создающим разрежение до 150 мм вод. ст. Для того, чтобы дымосос не засасывал воздух, верхнюю часть шахты заключают в стальной

кожух. Если устанавливается дутьевой вентилятор, то на урне газовых влетов следует поддерживать разрежение в пределах от 2 до 4 мм вод. ст.

Шахтные печи с газовым отоплением (рис. 140) состоят из шахты круглого или овального сечения с установленными вокруг нее газогенераторами или симметрично расположенными газовыми окнами (влетами). Диаметр круглой шахты не превышает 2 м, при рабочей высоте шахты 12—19 м. Генераторный газ с центральной станции, а также другие виды горючих газов, подаются в шахту через газовые влеты. Вторичный воздух поступает через выгрузочные отверстия, керн или через отверстия двускатного гребня, рассекающего спускающийся в нижнюю часть шахты материал. Производительность печей с газовым отоплением составляет до 50 т обожженной извести в сутки; расход тепла приведен в табл. 32.

Недостатком шахтных печей, отапливаемых газом, является трудность равномерного распределения газов по сечению и смешения его с воздухом. Материал в центральной части шахты обжигается слабее, чем на периферии. Высота этих печей должна быть больше, чем пересынных, чтобы обеспечить достаточный путь для смешения воздуха и газов, так как при температуре ниже 600—700° горение становится невозможным. В последнее время для более равномерного обжига и повышения производительности печей начинают применять «комбинированный» способ обжига извести, т. е. в полугазовые печи добавляют 10—15% топлива впересышку.

Шахтные печи для обжига гипса, шамота, доломита и магнезита

Для обезвоживания гипса применяют шахтные печи с топками полного горения, работающими на твердом кусковом топливе, которое сжигается на горизонтальных, наклонных или ступенчатых колосниковых решетках. Горизонтальное сечение шахты делается прямоугольным или же круглым диаметром не более 1,8 м, во избежание неравномерного обжига. Шахта обычно выполняется цилиндрической или в виде двух конусов, сомкнутых основаниями на расстоянии около одной трети высоты шахты. Примерно на той же высоте с обеих сторон печи располагаются выносные топки. Газы, поступающие в печь с температурой 800—900°, разбавляются воздухом, засасываемым через выгрузочные отверстия. Ввиду недостаточного количества охлаждающего воздуха, гипс выгружается из печи с температурой 200—300°. Для повышения производительности печи снабжаются дымососом, создающим разрежение 30—40 мм водяного столба. Сырье, дробленое до размера кусков 5—15 см загружают через загрузочное отверстие шахты, выложенное у основания дымовой трубы; загрузку топлива и уборку золы и шлака производят на площадке, расположенной перед топками.

Шахтные печи указанного типа обычно не механизированы и требуют для своего обслуживания значительного количества рабочих. Производительность печей составляет до 50 т штукатурного гипса в сутки. Удельная производительность и расход тепла приведены в табл. 32.

Эстрих-типе обезвоживают при температуре 800—1000° в шахтных печах, работающих по пересыпному способу, или слабейших полугазовыми топками, а также топками полного горения.

Шамот обжигают в шахтных печах как при высокой (1300—1350°), так и при низкой (700—800°) температурах. В том и другом случае в качестве топлива обычно применяется газ, так как при пересыпном способе обжига зола топлива, присаживаясь к обожженному шамоту, снижает его качество. При получении высококачественного шамота воздух должен быть нагрет в зоне охлаждения до температуры 400—600°. Получить низкокачественный шамот, ввиду низкой температуры обжига, можно наиболее успешно при сжигании генераторного газа в выносных топках или камерах, расположенных в кладке шахты. В последнее время шамотные брикеты с успехом начинают обжигать пересыпным способом.

Обжиг шамота в шахтных печах затрудняется тем обстоятельством, что глины, особенно жирные и пластичные, содержат значительное количество влаги, которая конденсируется на поверхности кусков холодной глины, загружаемой в шахту печи, особенно в зимнее время, когда глина смерзается. Конденсация водяных паров вызывает «растрескивание» глины и понижает температуру отходящих из печи газов и, следовательно, создаваемое дымовой трубой разрежение, в силу чего резко понижается производительность печей.

В печи Г. О. Гросса (рис. 141), в верхней части шахты предусмотрено дополнительное предварительное подогрева (зона трена дополнительная зона предварительного подогрева (зона прешаухования) глины при помощи горячего воздуха, поступающего из зоны охлаждения по вертикальным каналам, проложенным в кладке печи. Горячий воздух обогревает и частично конденсирует комовую или брикетированную глину, в силу чего наружные слои глины подсыхают и конденсация водяных паров уменьшается. Продукты горения и водяные пары отсасываются дымососом через отверстия, расположенные ниже зоны шаухования, и удаляются в дымовую трубу. В печах Гросса можно применять механизированную загрузку и выгрузку. Производительность печи Гросса составляет 25—30 т обожженной шамота в сутки; в зимнее время вследствие смерзания глины она понижается до 10—15 т.

Доломит до настоящего времени обжигают намертво в небольших шахтных печах типа вагранок, диаметром 1,25—3,0 м и высотой 6,0—10,0 м. В последнее время доломит обжигают в мощных шахтных печах, работающих по пересыпному спо-

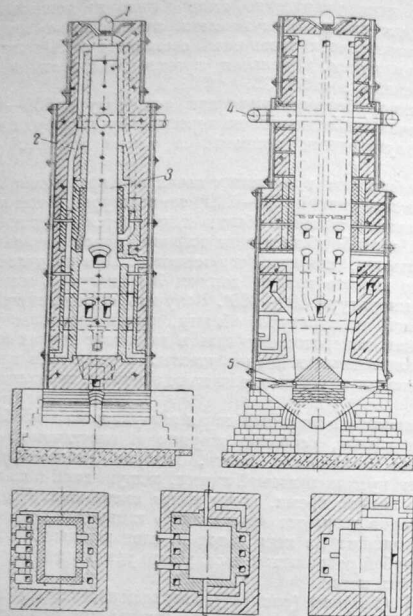


Рис. 141. Механизированная шахтная печь Гросса для обжига шамота:

1—загрузочное устройство; 2—шмаух-каналы; 3—шахта; 4—отвод отходящих газов; 5—разгрузочное устройство.

субу, и полностью механизированных. Топливом в большинстве случаев является кокс.

Магnezит обжигают намертво при температуре около 1600° в небольших шахтных печах, работающих на мазуте, который подают в шахту печи механическими форсунками низкого давления, расположенными на 1/4 высоты шахты.

Так как до 80% воздуха подается у форсунок, обожженный магnezит выходит из печи с температурой от 400 до 1200°, что приводит к большим потерям тепла и значительному расходу топлива. В последнее время мазут заменяют кусковым топливом. Опытные данные о работе шахтных печей при обжиге различных материалов приведены в табл. 33.

Таблица 33
Опытные данные о работе шахтных печей при обжиге различных материалов

Показатели	Обжигаемый материал				
	Штукатурный гипс	Известь		Шамот	Магnezит
Способ обжига	пламенный	полугазовый	пересыпной	газовый	на мазуте
		Средняя температура обжига в град	500		
Высота шахты печи (средней) в м	8,1	14,0	14,0	13,1	11,6
Диаметр шахты печи (средней) в м	—	2,3	2,5	—	1,85
Объем печи в м³	16,5	53,0	68,7	40,0	19,5
Род топлива	дрова	подмосковный уголь	антрацит АС	генераторный газ	мазут
Теплотворная способность топлива в кал/кг	2200	2724	6400	995*	9500
Начальная влажность материала в %	2,0	10,0	2,0	21,3	1,0
Температура материала, выходящего из печи, в град	300	100	100	60	800
Температура отходящих из печи газов в град	300	320	200	110	240
Избыток воздуха в печи	3,0—5,0	1,3	1,2	—	—
Средняя часовая производительность печи в кг/час	1950	750	2080	900	810
Средняя объемная производительность печи в кг/м³ в сутки	2860	340	730	540	1000
Удельный расход тепла в кал/кг	420	1300	1050	1008	1397

Основы расчета шахтных печей

При тепловом расчете шахтной печи заданными являются: производительность печи, размер кусков обжигаемого материала, температура отходящих газов и температура выходящего материала. Как и в других случаях, первоначально из теплового баланса определяют удельный расход тепла на обжиг, удельный расход воздуха и выход отходящих газов.

В табл. 34 приведены тепловые балансы шахтных печей. Гидравлическое сопротивление шахтных печей Δp в мм вод. ст. можно приближенно выразить формулой:

$$\Delta p = \varphi \cdot H \cdot \left(\frac{Q}{F}\right)^{1,1} \quad (32)$$

* В кал/м³.

№ п/п.	Статьи	Цементный клинкер, способ «черного» брикета		Известь, пересыпной способ	
		кал/кг	%	кал/кг	%
1	Теоретический расход тепла	400	30,8	685	65,3
2	Потеря тепла на испарение влаги из материала	162	12,5	44	4,2
3	Потеря тепла с отходящими газами	225	17,4	211	20,0
4	Потеря тепла от химического недожога топлива	388	30,0	20	1,9
5	Потеря тепла от механического недожога топлива	39	3,0	8	0,7
6	Потеря тепла с уносом	5	0,4	—	—
7	Потеря тепла с материалом	50	3,9	21	2,0
8	Потеря тепла в окружающую среду	25	2,0	61	5,9
9	Общий расход тепла	1295	100,0	1050	100,0
10	Тепловой к. п. д.	—	39,8	—	65,3

где: H — высота печи в м,
 Q — тепловая мощность печи в кал/час;
 F — площадь поперечного сечения печи в м²;
 φ — коэффициент.

На основании опытных данных значение коэффициента φ при обжиге цементного клинкера в зависимости от степени пластичности сырья изменяется в следующих пределах:

для гранулированного материала (0,7—1,0) 10^{-10} ;
 для крупного брикета (0,45—0,6) 10^{-10} ;
 для валяшки (0,35—0,45) 10^{-10} .

Из формулы (32) тепловая мощность печи равна:

$$Q = Gq = \frac{0,785 D^2}{V\varphi} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{H}} \quad (33)$$

откуда

$$G = \frac{0,785 D^2}{q V\varphi} \sqrt{\frac{\Delta p}{H}} \quad (34)$$

где: G — производительность печи в кг/час;
 q — удельный расход тепла на обжиг в кал/кг;
 D — диаметр печи в м.

Как видно из формулы (34), производительность шахтной печи при прочих равных условиях зависит от давления дутья, которое, например, при обжиге цементного клинкера достигает величины 1500—2500 мм вод. ст.

Для получения заданной температуры отходящих газов и выходящего материала, последний должен находиться в шахтной печи в течение известного времени, определяющегося в общем случае условиями теплопередачи и горения топлива. Поэтому наряду с формулой (34) для производительности печи должно быть также справедливо выражение:

$$G = \frac{0,785 D^2 H \gamma_m}{\tau} \quad (35)$$

где: γ_m — насыпной вес материала в кг/м³;
 τ — время пребывания материала в печи в часах.

Время пребывания в зоне горения τ_g в сек. можно приближенно определить по формуле Л. А. Вулиса:

$$\tau_g = \frac{4,94 \cdot \beta \gamma^2}{28\beta \sqrt{Re_0}} \quad (36)$$

где: r — начальный размер кусков в м;
 β — отношение весов реагирующих веществ (при горении до CO $\beta=1,33$, при горении до CO₂ $\beta=2,66$);

γ — удельный вес беззолыной горючей массы в кг/м³;
 θ — концентрация кислорода;

S — коэффициент диффузии кислорода к кускам в м²/сек;
 Re_0 — число Рейнольдса для кусков начального размера.

Время поджога и охлаждения материала в шахтной печи определяется процессом теплопередачи и может быть выражено формулой:

$$\tau_m = \frac{gc}{\alpha_0 X} \ln \left(\frac{t_g - t_m}{t_g - t_m'} \right) \quad (37)$$

где: τ_m — время в часах;
 g — вес куска материала, приходящийся на 1 м² наружной поверхности в кг;
 c — удельная теплосмкость материала в кал/кг град.;
 t_g — температура газов в град.;
 t_m' — начальная температура материала в град.;
 t_m — конечная температура материала в град. час;
 α_0 — суммарный коэффициент теплоотдачи в кал/м² град. час;
 X — коэффициент, зависящий от формы куска и критерия

$$Bi = \frac{\alpha_0 \delta}{2\lambda_m} \quad (\text{табл. 35});$$

δ — диаметр куска в м;
 λ_m — коэффициент теплопроводности материала в кал/м град. час.

В зоне охлаждения теплопередача происходит исключительно конвекцией. В зоне же поджога к конвекции добавляется излучением. В зоне же поджога к конвекции добавляется излучением. Коэффициент теплоотдачи конвекции складывается из коэффициентов теплоотдачи конвекции и излучением. Коэффициент теплоотдачи конвекции в слое сыпучего материала выражается формулами (65) и (67) (глава III).

Таблица 35

Зависимость коэффициента X в формуле (37) от формы кусков материалаи от величины критерия $Bi = \frac{\alpha_0 \delta}{2 \lambda_M}$

$\frac{\alpha_0 \delta}{2 \lambda_M}$	X			$\frac{\alpha_0 \delta}{2 \lambda_M}$	X		
	Плита	Цилиндр	Шар		Плита	Цилиндр	Шар
0	1,00	1,00	1,00	1,8	0,615	0,66	0,715
0,2	0,925	0,965	0,965	2,0	0,59	0,635	0,69
0,4	0,87	0,905	0,925	2,2	0,565	0,615	0,67
0,6	0,825	0,85	0,89	2,4	0,54	0,60	0,65
0,8	0,78	0,82	0,855	2,6	0,515	0,58	0,63
1,0	0,745	0,785	0,825	2,8	0,50	0,565	0,615
1,2	0,71	0,75	0,795	3,0	0,485	0,55	0,60
1,4	0,675	0,715	0,765	3,5	0,44	0,51	0,56
1,6	0,645	0,685	0,74	4,0	0,41	0,48	0,53

Коэффициент теплоотдачи излучением α_a в $\text{кал/м}^2 \text{град. час.}$ определяется по формуле:

$$\alpha_a = \frac{Q}{t_c - t_M} \quad (58)$$

Величина Q подсчитывается по формуле (33) (глава III), в которой поверхность теплопередачи принимается равной 1 м^2 . При определении степени черноты газа толщина излучающего газового слоя, равная диаметру межкусковых каналов, выражается формулой (55) (глава III).

При расчете времени подогрева и охлаждения материала шахтная печь должна быть разделена по высоте на отдельные участки. С помощью теплового баланса и значения притока теплового коэффициента полезного действия строится диаграмма теплосодержание — температура для нагревающей и нагреваемой среды, по которой определяется разность температур этих сред на каждом участке. Средняя условная удельная теплоемкость материала [формула (37)] на протяжении каждого участка определяется как разность теплосодержания в конце и в начале его, деленная на разность температур материала в этих точках. Таким образом в удельную теплоемкость включается также скрытая теплота испарения воды и тепловые эффекты реакций диссоциации карбонатов и др.

В табл. 36 приведены результаты расчета длительности обжига цементного клинкера в зависимости от изменения размеров брикетов и скорости газов в печи.

Приравняв выражения (34) и (35) и решив полученное уравнение относительно H и D , соответственно получаем:

$$H = \sqrt[3]{\frac{\Delta p}{\varphi} \left(\frac{\tau}{\gamma_M \Delta p} \right)^3} \quad (39)$$

$$D = \sqrt[6]{G^3 \cdot q^2 \frac{\tau}{\gamma_M \Delta p}} \quad (40)$$

Потребный расход воздуха в единицу времени с учетом потерь через шлюзовое устройство и необходимого запаса, а также приято давление дутья, определяют выбор дутьевого вентилятора.

Выполнение теплового расчета в нескольких вариантах позволяет определить оптимальную в технико-экономическом отношении характеристику шахтной печи.

4. КОЛОСНИКОВЫЕ РЕШЕТКИ ДЛЯ ОБЖИГА ЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА

При обжиге цементного клинкера на бесконечной колосниковой решетке (рис. 142), смесь цементной сырьевой муки, обожженного клинкера (в количестве 60—80 частей на 100 частей сырьевой муки) и дробленого (до размера кусков 3 мм) топлива с незначительным содержанием летучих веществ (кокс, коксик, антрацит) предварительно гранулируется во вращающемся барабане $1,6 \times 4,1 \text{ м}$ с добавкой 9—14% воды. Обожженный клинкер добавляется для облегчения просасывания воздуха через слой материала толщиной около 45 см, так как хорошая газопроницаемость обжигаемой шихты является основной предпосылкой для осуществления процесса. Клинкер не только повышает газопроницаемость шихты, но и снижает содержание в ней CaCO_3 , облегчая, таким образом, клинкерообразование. Кроме того, обожженный клинкер употребляется для образования подстилки, защищающей решетку.

При поверхности решетки 13 м^2 ее ширина равна 1,5 м, а производительность достигает 150 т/сутки. При поверхности 26 м^2 ширина решетки и производительность составляют соответственно

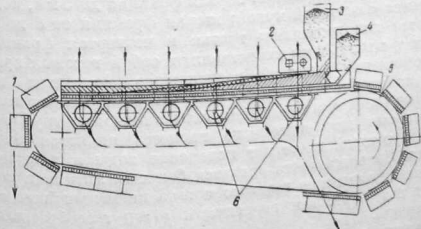


Рис. 142. Колосниковая решетка для обжига цементного клинкера.

1 — подстилка; 2 — закипательное устройство; 3 — бункер для сырьевой смеси; 4 — бункер для подстилки; 5 — привальная звездочка; 6 — отсасывающие камеры.

Таблица 36

Зависимость длительности обжига цементного клинкера в шахтной печи от размера брикетов и скорости воздуха

Зоны	Время нахождения в час.					
	Условная скорость воздуха 0,3 м/сек.			Диаметр брикета 15 мм		
	Диаметр брикета в мм			Условная скорость воздуха в м/сек.		
	15	30	120	0,3	0,6	0,9
Подогрева	0,182	0,338	1,75	0,182	0,107	0,080
Горения	0,114	0,332	2,58	0,113	0,081	0,067
Охлаждения	0,615	1,250	5,39	0,615	0,350	0,245
Итого	0,911	1,910	9,72	0,910	0,538	0,392

2,0 м и 300 т/сутки. Длина отдельной секции решетки, состоящей из колосников с щелями в 2—4 мм, равна 1 м.

На решетке материал зажигается особым горном, работающим на нефти, угольной пыли или газе, и процесс горения распространяется по всему слою со скоростью до 3 см/мин., вследствие движения решетки и просасывания через нее воздуха. На $\frac{2}{3}$ длины решетки все топливо выгорает, последовательно протекающие процессы сушки, диссоциации карбонатов и спекания заканчиваются, и на оставшей $\frac{1}{3}$ длины просасываемый воздух охлаждает материал. С решетки обожженный материал поступает в вальцы, под которыми расположены вибрационные сита, сортирующие клинкер на 4 фракции: первая фракция до 5 мм, подается для смешения с сырьевой мукой; вторая фракция от 8 до 20 мм используется для подстилки; третья и четвертая фракции от 5 до 8 мм и свыше 20 мм представляют собой готовый продукт. Под колосниковой решеткой расположено несколько камер, соединенных трубопроводами с эксгаустером, присасывающим воздух через решетку и отводящим газы в дымовую трубу.

Характерным для описанного процесса является большая скорость, с которой протекает испарение воды и диссоциация карбонатов. Причиной этого является большая активная поверхность пшты, разделение газового потока на мельчайшие струи, отсутствие потерь тепла и энергичный отвод газообразных продуктов реакции.

Достоинства способа обжига на колосниковой решетке заключаются в следующем: 1) возможности периодической работы, 2) незначительной потребности в огнеупорных футеровочных материалах, 3) доступности для наблюдения за процессом обжига.

Наряду с этими преимуществами способ имеет недостатки: 1) сложность и недостаточная надежность установки; 2) необходимость использования топлива с небольшим содержанием летучих; 3) значительный удельный расход энергии. Капитальные затраты при этом способе обжига и при обжиге во вращающихся печах примерно одинаковы. Однако при использовании в качестве сырья сланцевого кокса и других содержащих топливо сырьевых материалов колосниковые решетки, как и шахтные печи, имеют преимущество перед вращающимися печами. Целесообразно также применять их для обжига специальных цементов с высоким содержанием глинозема или железа, например, глиноземистого цемента, так как в этом случае устранились затруднения, которые связаны с образованием приваров на футеровке, имеющих место во вращающихся и шахтных печах. Выбор колосниковой решетки для обжига обычного цементного клинкера может оказаться удачным решением вопроса при строительстве цементных заводов небольшой мощности в отдаленных районах, для которых существенное значение имеют простота и доступность оборудования. В этих случаях можно применять колосниковые решетки периодического действия, обладающие указанными качествами.

5. ВРАЩАЮЩИЕСЯ БАРАБАНЫ ДЛЯ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ГИПСА

Обезвоживание (дегидратация) гипса с получением шпугатурного гипса (алебаstra) во вращающихся барабанах имеет много общего с сушкой дробленых материалов. Перед подачей в барабан гипс дробится до величины кусков 0,4—1,5 мм. В процессе обезвоживания имеет место значительная текучесть мелких фракций гипса.

Вращающиеся барабаны оборудуют выносными, шахтными или механическими топками, снабженными смесительными камерами для понижения температуры газов от 1100 до 700—500°. Выходящий из топки газовый поток непосредственно обогревает предварительно раздробленный сырой гипс, проходя через открытый конец во внутреннюю полость барабана, или же обогревает наружную поверхность барабана, проходя затем по внутренней жаровой трубе (рис. 143) и не соприкасаясь с обжигаемым материалом. В первом случае гипс до известной степени переохладится золой. В барабанах устанавливают специальные перегородки с отверстиями—диафрагмы, замедляющие продвижение гипса по барабану, что способствует его созреванию в процессе обезвоживания. Кроме того, можно расширять диаметр барабана в средней его части, устанавливать подпорные кольца (диафрагмы) на выходе из барабана и устранять различные мешающие приспособления для увеличения времени пребывания материала в барабанах и его переувлажнения.

Гипс обезвоживают в ячeyковых сушильных барабанах, а также в барабанах, снабженных подъемно-лопастными или каскад-

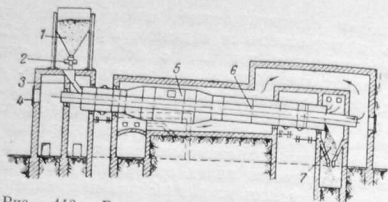


Рис. 143. Вращающийся барабан для обезвоживания гипса.
1—бункер; 2—питатель; 3—течка; 4—люк; 5—барабан; 6—нарочная труба; 7—разгрузочная камера.

ными перемешивающими приспособлениями. Длина барабана обычно колеблется от 8 до 14 м, а его диаметр от 1,5 до 2,8 м. Угол наклона составляет 2—5°, число оборотов 0,25—6 об/мин. Производительность колеблется от 1,5 до 12 т/час штукатурного гипса и выше; расход условного топлива от 4,5 до 6% от веса

Таблица 37

Обычные данные о работе вращающихся барабанов для обезвоживания гипса

Основные характеристики	Барабан Поплавокского	Барабан Манжур-нета	Ячейковый сушильный барабан
Длина барабана в м.	11,0	9,5	—
Диаметр в м.	1,75	1,6	13,0
Число оборотов барабана в 1 мин.	1,0	1,0	2,2
Точка	—	1,0	2,0
Род топлива	—	высокая антрацитовый штыб	—
Нижняя теплотворная способность топлива в кал/кг	мазут	—	—
Содержание гигроскопической влаги в гипсовом камне в %	10050	0,5	—
Содержание гидратной влаги в %	2,2	20,3	2,0
Температура в град.	20,32	—	20,0
Гипса, выгружаемого из барабана	—	—	—
Газов, уходящих из барабана	158	92	—
Коэффициент избытка воздуха за барабаном	172	—	175
Производительность барабана в т/час.	2,15	—	—
То же в т/м³ сутки	2,84	1,85	7,6—8,0
Напряжение барабана по влаге в кг/м² час.	2,55	1,83	4,0—4,21
Удельный расход тепла в кал/кг	18,92	14,82	31,6—33,0
	333	308	313

готовой продукции (табл. 37). Температура обезвоживания гипса составляет 170—250°. Так как обезвоженный продукт состоит из мелких фракций, весьма важное значение имеет обеспыливание газов, которое производится в циклонах, бета-фильтрах и электродфильтрах. Скорость газов в барабане не должна превышать 1—1,5 м/сек.

К преимуществам обезвоживания гипса во вращающихся барабанах следует отнести значительную производительность и поточность производства, к недостаткам—относительную сложность достижения хороших условий варки, вызываемую физическими свойствами материала.

6. ВАРОЧНЫЕ КОТЛЫ ДЛЯ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ГИПСА

Варочный котел (рис. 144) состоит из сварного или клепаного стального цилиндра диаметром 1,6—2,0 м и высотой 0,7—1,5 м. Дно котла собирается из чугунных сегментов толщиной 60—90 мм, которые стягиваются стальными пружинами. Днище имеет плоскую или сферическую форму; в последнем случае поверхность его увеличивается. Предварительно перемолотый гипсовый камень загружается через тежку в верхнюю часть котла, перемешивается непрерывно действующей мешалкой, нагревается («вскипает») и затем выгружается через тежку в нижней части котла. Тежка герметически закрывается подвижной. Котел устанавливается на неподвижном покое, выложенном шамотным кирпичом и снабжается топкой, конструкция которой определяется родом применяемого топлива. Продукты горения обогревают сначала днище, затем стенки котла и с температурой 500—600° удаляются через сборный боров в дымовую трубу. При установке нескольких котлов в блоке они соединяются общим боровом, ведущим к дымовой трубе.

Продолжительность варки гипса составляет 1,5—2,0 часа. Производительность варочных котлов составляет от 500 кг/час. обожженного гипса на 1 м³ емкости котла и выше. Емкость котлов 1,0÷16 т. Расход условного топлива составляет около 6% веса обожженного продукта. Расход мощности 1—15 квт. Основным пре-

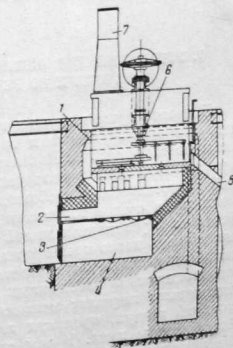


Рис. 144. Варочный котел для обезвоживания гипса:
1—варочный котел; 2—течка; 3—колосниковая решетка; 4—воздушная заслонка; 5—течка; 6—мешалка; 7—дымовая труба.

нмуществом варки гипса в котлах является отсутствие соприно-
сновения материала с горячими газами, что дает возможность
подучать чистый гипс. К недостаткам относятся периодичность
работы и большой расход энергии при помоле сырого гипсового
камня, особенно если гигроскопическая влажность его превы-
шает 2—3%.

Таблица 38

Опытные данные о работе варочного котла
для обезвоживания гипса

Емкость котла	2,54
Род топлива	Дрова
Тип топки	Колосниковая с горизонталь- ным зеркалом горения
Начальная температура газов в град.	670
Температура отходящих газов в град.	525
Температура обжигаемого материала в град.	160—170
Продолжительность обжига в час . . .	2,25
Удельный расход тепла в кал/кг . . .	450

7. УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ГИПСА В ПРОЦЕССЕ РАЗМОЛА И ВО ВЗВЕШЕННОМ СОСТОЯНИИ

В производстве вяжущих веществ установки для обезвожива-
ния в процессе размолта и во взвешенном состоянии, выполня-
емые по схемам Б. А. Козлова и М. О. Юшкевича, получают рас-
пространение при производстве штукатурного гипса. Принцип
работы установки для обезвоживания гипса в процессе размолта
аналогичен сушке топлива в процессе размолта и может при-
меняться в установках малой и средней мощности. Сырой гипсо-
вый камень после предварительного дробления подается в мель-
ницу или сначала подогривается в специальных бункерах. Помол
производится в снабженных сепараторами быстроходных или
тихоходных шаровых мельницах, через которые просасывается
горячий воздух, продукты горения из специальных топок или
отработанные газы. В том случае, когда обезвоживание гипса
не заканчивается в мельнице, за нею устанавливается труба-
сушилка, в которую нередко подается дополнительное количество
горячих газов. Обезвоженный продукт улавливается различного
рода обеспыливающими устройствами и поступает в бункеры.
Материалы, состоящие из мелких фракций (например, фосфор-

гипс, являющийся отходом хи-
мического производства), обез-
воживаются без предваритель-
ного помола в трубах-сушил-
ках во взвешенном состоянии га-
зами с начальной температу-
рой 300—500°.

Схема работы установки по
обезвоживанию гипса в процессе
размола (рис. 145) такова: сырой
гипсовый камень, предвари-
тельно раздробленный в дробилке
1 до размера 15 мм, при помощи
элеватора 2 и питателя подается
в быстроходную мельницу 3,
в которую из смеистой камеры
меры специальной топки 4 по-
ступает газозвдушенная смесь
с температурой 400—450°. В про-
цессе размолта гипс обезвожи-

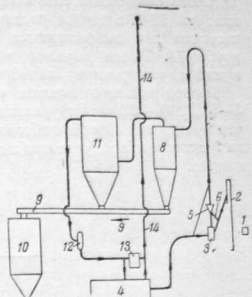


Рис. 145. Схема установки для обез-
воживания гипса во взвешенном со-
стоянии.

вается и выносятся из мельницы сильной струей воздуха в сепаратор 5, где отделяются крупные фракции гипса, возвращающиеся по трубе 6 обратно в мельницу. Из сепаратора 5 гипс остужается в трубу 7 для окончательного обезвоживания (до остаточной влажности 6,5%) и в циклон 8, в котором осаждаются крупные фракции гипса, транспортируемые шнеком 9 в силосы 10. Мелкие фракции осаждаются в специальном фильтре 11, из

Таблица 39

Опытные данные о работе установок для обезвоживания гипса
в процессе помола

Основные характеристики	I		II
	1	2	3
Производительность установки в т/час . . .	3,3		4,25
Расход электроэнергии на 1 т сырого гипса в квч	12,6		25,0*
Расход условного топлива в % веса го- тового гипса	3,97		5,0
Температура газов перед мельницей в град.	520		450
Температура газов после циклона в град.	150		120
Температура готового материала по вы- ходе из циклона в град.	110		110
Диаметр (в свету) обжиговой трубы в м . . .	—		0,6
Длина обжиговой трубы в м	—		25,0

* По готовой продукции.

которого очищенный газоздушный поток отсасывается вентилятором 12 и подается частично в смесительную камеру топлив, частично же выбрасывается через камеры 13 в выхлопную трубу 14. Таким образом в системе осуществлен полужамкнутый цикл с рециркуляцией части газов.

Расход условного топлива в подобных установках составляет 4—5% (280—350 кал/кг); расход энергии на размол гипса меньше, чем при других способах обезвоживания, и составляет 17—25 квт на 1 т готового продукта при значительно более высокой тонкости помола.

Глава пятнадцатая

ПЕЧИ КЕРАМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

Печи керамических производств служат для сушки и обжига формованных керамических изделий и сырых материалов, а также для варки подсобных продуктов. Керамическими изделиями являются изделия из различных сортов глины, глиняных и других силикатных и несиликатных масс и материалов. К ним относятся изделия строительной керамики (красный кирпич, кровельная черепица, дренажные трубы и др.), изделия из огнеупорных материалов (динасовые, шамотные, доломитовые, магнезитовые), тонко керамические изделия (облицовочные материалы, фарфоровые и фаянсовые изделия, электроизоляционная керамика), а также каменный товар (глиняные кирпичи и камни, метлахские плитки) и кислотоупорные изделия.

К сырым материалам, требующим предварительного обжига, относятся: глина, доломит, магнезит и другие материалы.

К подобным материалам можно отнести глазури, эмали и флюсы. В зависимости от процессов, протекающих в печах, печи керамических производств подразделяются на следующие группы:

а) печи для обжига формованных изделий и кусковых материалов;

б) печи для плавки подсобных продуктов и производства литых материалов;

в) печи для сушки формованных изделий и кусковых материалов.

Печи для сушки рассматриваются в главе XII

Подсобные продукты обычно плавят в небольших ваннах или барабанных фриттоварочных печах с периодической загрузкой, подобных аналогичным печам стеклобойной промышленности. Для производства литых высокоогнеупорных материалов (муллита, плавленного магнезита, карбида кремния и др.) применяют электрические печи (см. гл. X).

Кусковые материалы, как правило, обжигают в шахтных и вращающихся печах (см. гл. XIV).

В настоящей главе рассматриваются печи для обжига керамических формованных изделий.

1. ПРОЦЕСС ОБЖИГА КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Процесс обжига керамических изделий¹ заключается в термической обработке их при определенном температурном и газовом режимах. Под влиянием теплового воздействия в керамических

массах происходит ряд физико-химических процессов, в результате которых меняются структура и свойства обжигаемых масс.

Сущность происходящих изменений материала в процессе обжига заключается в большей или меньшей степени спекания материала. Жидкая стекловидная фаза, образующаяся при высоких температурах вокруг мельчайших частиц материала, при охлаждении цементирует частицы, резко повышая механическую прочность. Одновременно происходит и ряд других реакций, изменяющих свойства материала (дегидратация, образование новых химических соединений и сплавов, полиморфные преобразования компонентов массы, рекристаллизация и др.). Образующаяся при обжиге жидкая фаза заполняет полностью или частично поры материала, в результате чего происходит усадка изделий. Чтобы получить лучшие показатели по свойствам, каждый вид изделий надо доводить до определенной степени спекания. Так в производстве фарфоровых изделий спекание доводят почти до полного уничтожения пористости. В производстве огнеупорного кирпича продукция в большинстве случаев обладает еще значительной пористостью.

Конечная температура обжига какого-либо материала не является определенной величиной, а находится в зависимости от того режима, при котором была достигнута эта температура. Точно так же и время выдержки на конечной и промежуточных температурах зависит от величины этих температур.

При обжиге многих материалов для успешного протекания требуемых реакций или, наоборот, предупреждения возможности их возникновения требуется определенная газовая среда. Так при обжиге фарфоровых изделий сначала нужна окислительная атмосфера для окисления всех органических примесей в массе, а затем восстановительная для перевода окислов железа, присутствующих в массе, из окисного состояния в закисное. В других случаях, например, в массах содержащих окислы титана, наоборот, требуется окислительная атмосфера, во избежание восстановления окислов титана. При обжиге глазурованных изделий или в период обжига до полного закрытия наружных пор изделия, газовая среда должна способствовать реакциям в обжигаемой массе, протекающим с выделением газообразных продуктов. Эти реакции должны быть закончены к моменту закрытия пор на поверхности изделия во избежание получения бракованных изделий.

В процессе обжига изменяется объем материала вследствие структурных изменений в твердом состоянии, усадки при заполнении пор жидкой фазой, а так же и в результате изменения размеров при нагреве и охлаждении изделий. Неравномерное изменение объема материала по сечению изделия приводит к образованию внутренних напряжений, которые по достижении определенных величин могут вызвать образование трещин при твердом состоянии материала или деформацию изделия при наличии жидкой

фазы. Поэтому температуры в процессе обжига должны изменяться с такой скоростью, при которой возникающие внутренние напряжения в обжигаемых материалах или изделиях не превосходят допустимых.

Продолжительность обжига зависит так же от конструкции печи. В печах с большими сечениями рабочего пространства, неравномерным распределением поступающего тепла при наличии подсосов холодного воздуха и других причин, увеличиваются температурные перепады по сечению печи, обжиг более длителен, чем в печах малого сечения. Устранение причин, вызывающих неравномерность условий обжига по сечению печи позволяет сократить продолжительность обжига.

В табл. 40 приведена продолжительность обжига хозяйственного фарфора в горнах в периодическом действии в зависимости от объема горна.

Таблица 40

Зависимость продолжительности обжига хозяйственного фарфора от объема горнов периодического действия

Объем горна в м ³	Продолжительность периода обжига (в часах)					Охлаждение
	Прокуривание	Подъем температуры	Выдержка	Восстановительный режим	Нейтральный режим	
До 60	2	5	6	4	5	22
60—80	2	5	6	5	6	24
80—100	2	5	7	5	7	26
100—120	3	6	7	5	7	28
120—140	4	7	8	5	8	32

В зависимости от мощности вентиляционных установок 32—45 часов

До последнего времени режимы обжига определяли опытным путем или по аналогии с принятыми режимами на одноступенчатых установках, без учета всех особенностей производства. В результате режимы обжига не всегда соответствовали оптимальным условиям.

Применение стахановских методов работы дало возможность сократить продолжительность обжига на 20—60%. Улучшение конструкции печей позволит добиться дальнейшего сокращения продолжительности обжига и приблизить ее к теоретически возможной для данного материала.

2. ТИПЫ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ОБЖИГА ФОРМОВАННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Керамические изделия до недавнего времени обжигали, главным образом, в печах периодического действия. Мощное развитие керамического производства в годы Сталинских пятилеток

привело к необходимости замены устаревших печей более совершенными печами непрерывного действия, которые более точно все большее распространение. Современное состояние техники обуславливает все возрастающие требования к качеству продукции, а также необходимость изготовления материалов с особыми требованиями в отношении огнеупорности, термостойкости, механической прочности, электропроводности и т. п. свойств. Это привело к разработке совершенно новых керамических материалов, требующих особых режимов обжига, и вызывающих необходимость не только постоянного усовершенствования существующих конструкций, но и создания новых типов печей, могущих удовлетворить особым требованиям предъявляемым к обжигу.

Печи для обжига формованных изделий, применяемые в керамических производствах, различают по способу выделения тепла, цикличности работы и конструктивным признакам (см. гл. 1).

3. ПЛАМЕННЫЕ ПЕЧИ

Печи периодического действия

В печах периодического действия в одном и том же объеме последовательно осуществляется весь цикл обжига, включая загрузку сырых и выгрузку обожженных изделий. Вследствие периодичности работы, кладка печи попеременно нагревается и охлаждается, что приводит к значительной затрате тепла на аккумуляцию кладкой в период подъема температур. Тепловая экономичность работы печей периодического действия в значительной мере определяется величиной поверхности стен печи, приходящейся на единицу обжигаемых изделий. Чем больше объем рабочего пространства печи, тем меньше удельная поверхность стен и, следовательно, тем меньше относительная аккумуляция тепла.

С этой точки зрения более экономичны печи с большим объемом одновременно обжигаемых изделий. Однако с увеличением объема печи увеличивается неравномерность распределения температуры по высоте и поперечному сечению рабочей камеры, что вызывает необходимость удлинения процесса обжига для выравнивания температур в различных точках рабочего пространства. Неравномерная температура обжига приводит к увеличению выхода бракованных изделий.

Удлинение процесса обжига вызывает увеличение расхода топлива и продолжительности охлаждения вследствие сильного прогрева кладки, уменьшение производительности печи на единицу объема и увеличение затраты рабочей силы на единицу продукции, в результате чего повышается себестоимость последней.

Эти причины ограничивают возможность увеличения объема рабочего пространства печей периодического действия. При обжиге различной продукции, в зависимости от допустимого режима и степени неравномерности обжига определяют пре-

дельные, экономические выгодные размеры печи. Чем длительнее обжиг и чем значительнее допустимая неравномерность температуры, тем больше могут быть размеры печи.

Вследствие последовательного протекания всех стадий обжига, температура отходящих газов в печах периодического действия всегда выше температуры рабочего пространства печи. Это вызывает большую потерю тепла с отходящими газами, в особенности в период высоких температур обжига.

Указанные причины обуславливают большой расход топлива, а необходимость ручной загрузки и выгрузки обжигаемого товара — большой расход рабочей силы на обслуживание печи.

Однако наряду с указанными недостатками печи периодического действия отличаются крайней простотой конструкции и дают возможность регулировать процесс обжига и охлаждения в весьма широких пределах как в отношении температурного, так и газового режимов.

Благодаря таким преимуществам эти печи применяются во всех отраслях керамического производства и их продолжают строить несмотря на наличие печей более экономичных по расходу топлива.

Напольные печи. Простейшим видом периодически действующих печей для обжига керамических изделий являются напольные печи, применяемые вследствие своей чрезвычайной простоты в кустарных производствах для обжига красного кирпича, кровельной черепицы и извести.

Напольные печи строятся емкостью от 15 до 40 тыс. шт. кирпича.

Стены напольной печи выкладывают из обожженного кирпича или кирпича-сырца. В нижней части печи оставляют оцелки-каналы, в которых сжигается топливо: дрова, уголь, торф, газ, мазут. Оцелки прикрывают сводиками из обожженного кирпича. На полу печи садят кирпич-сырец или кирпич совместно с черепицей; кирпич садят на ребро, а черепицу — возможно плотнее, и вертикальными рядами. Верх садки закладывают сырцом и завертикальными рядами. Верх стен и в перекрестки предусматривают замазывать глиной. Вдоль стен и в перекрестки предусматривают отверстия для отвода газов, расположенные в шахматном порядке.

Обжиг в напольных печах малоэкономичен, расход условного топлива составляет от 22 до 40% веса обожженной продукции или 1540—2800 кал/кг обожженной продукции.

Качество обожженных изделий зависит от опыта и квалификации обслуживающего персонала. Условия обслуживания этих печей при загрузке и выгрузке изделий очень тяжелы и с трудом поддаются механизации.

Однокамерные печи (горны). Однокамерные печи строят с различным направлением движения газового потока.

В печах с восходящим направлением газов продукты горения поступают в рабочую камеру снизу и выходят через отверстия в своде.

Для уменьшения неравномерности температуры по горизонтальному и вертикальному сечениям рабочей камеры, достигающей значительной величины, в своде печи устраивают ряд отверстий, выход газов из которых регулируется заслонками.

Печи, в которых газы подаются снизу и отводятся через отверстие в поде рабочей камеры, называют печами с обратным движением газов.

Газы собираются в подподошвы каналов и через дымовый боров отводятся в дымовую трубу. Распределение температур в этих печах более равномерное.

Для использования тепла отходящих газов однокамерные печи как с восходящим, так и с нисходящим направлением газов делают двух- и трехэтажными, используя тепло газов, выходящих из нижней камеры, в камерах второго и третьего этажей. Подобные печи распространены, главным образом, в производстве тонко керамических изделий, требующих двойного обжига при различных температурах.

В настоящее время однокамерные печи делают, как правило, с обратным направлением газов.

Емкость однокамерных печей колеблется в значительных пределах: от 0,01 до 400—500 м³.

Емкость печи обуславливается не только требуемой производительностью, но и необходимостью равномерного распределения температуры по объему рабочей камеры.

Для обжига технического фарфора и абразивных изделий наиболее распространены печи с объемом рабочей камеры от 50 до 100 м³, а для обжига хозяйственного фарфора и фаянсовых изделий — от 100 до 200 м³.

Печи объемом до 400—500 м³ применяют для обжига огнеупорных изделий.

С увеличением емкости печи потери тепла на аккумуляцию кладки и в окружающее пространство относительно уменьшаются, что приводит к снижению удельного расхода топлива на обжиг, но усложняет конструкцию печи.

Камерные печи могут быть как круглыми, так и прямоугольными. При равных объемах круглые печи по сравнению с прямоугольными имеют меньшую боковую поверхность и меньший объем кладки. Поэтому в круглых печах потеря тепла на аккумуляцию и в окружающее печь пространство на 2—5% ниже, чем в прямоугольных. В круглых печах точки располагаются более равномерно по периметру печи. Площадь пода печи, приходящаяся на отдельную точку, представляет собой сектор, площадь которого находящаяся в непосредственной близости от точки, максимальна и постепенно уменьшается до нуля в центре печи. Это улучшает условия теплообмена и уменьшает перепады температуры по сечению печи по сравнению с прямоугольными печами. Кроме того, круглые печи имеют большую строительную прочность.

Сказанное относится к печам объемом 50—200 м³. В печах малого объема с одной-двумя топками не имеется преимуществ в условиях теплопередачи при круглой форме рабочего пространства, по сравнению с прямоугольной.

В печах большого объема увеличиваются перепады температуры по сечению вследствие большого диаметра печи и увеличения сферы действия отдельной точки, тогда как в прямоугольных печах сферу действия точки можно сохранять неизменной путем изменения соотношения между шириной и длиной печи. Кроме того, преимуществом прямоугольных печей является удобство их размещения в цехе и блокировки. Поэтому печи с небольшим объемом рабочего пространства и большие печи объемом 300—500 м³ почти всегда имеют прямоугольную форму.

Высота камер печей определяется свойствами обжигаемого материала. Так, например, при обжиге огнеупорных изделий высота садки определяется допустимой нагрузкой в процессе обжига на нижние ряды сырпа. В соответствии с этим высота камеры колеблется в пределах 2,5—4 м. При обжиге в кашелях, имеющихся большую механическую прочность по сравнению с сырпом, высота камер составляет в среднем от 3,0 до 5,5 м, достигая в устаревших конструкциях до 7 м. Такой большой высоты садки в вновь строящихся горнах не применяют, так как при этом значительно затрудняется ставка и выгрузка продукции и увеличивается неравномерность обжига по высоте.

Диаметр круглых печей для обжига технического фарфора колеблется в пределах 3,8—5,9 м. Диаметр горнов для обжига хозяйственного фарфора достигает 6,8—7,9 м.

Горны огнеупорной промышленности имеют диаметр 5,5—11,6 м.

Соотношение между длиной и шириной прямоугольных печей находится в пределах 1,0:2,5. Максимальная ширина достигает 4,1—5,6 м.

Стены однокамерных печей из соображений строительной прочности делают толщиной 0,9—1,2 м.

При большой продолжительности обжига стены прогреваются на всю толщину. Потери тепла на аккумуляцию стенами и сводами печей в несколько раз превосходят потери в окружающее пространство и достигают 20—23% общего расхода тепла на обжиг.

Тепловые потери через стены печи толщиной 500 мм иллюстрируются рис. 146. В первые часы от начала обжига имеют место только потери тепла на аккумуляцию, затем к этим потерям добавляются также потери за счет лучеиспускания. Через некоторый промежуток времени остается только последний вид потерь.

По мере остывания изделий аккумулярованное тепло и тем самым начинает переходить обратно в рабочую камеру печи и тем самым замедляется охлаждение изделий. Таким образом, в этот период кладка отдает аккумулярованное тепло с обеих поверхностей,

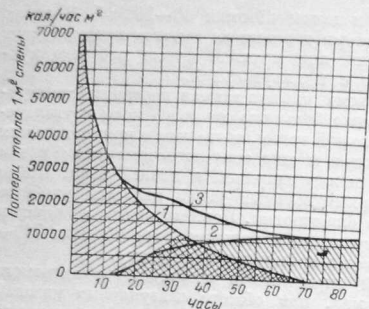


Рис. 146. Потери тепла стенами однокамерной печи:

1 — потери на аккумуляцию; 2 — потери в окружающую среду; 3 — суммарные потери.

Конструкция сводов однокамерных печей различна и выполняется различно. Прямоугольные печи обычно снабжают высокими циркульными сводами, имеющими наименьшие статические и температурные напряжения. Однако, так как в циркульных сводах могут возникать напряжения, эксцентрические по отношению к средней оси арки, и, кроме того, при обжиге некоторых изделий, например, канализационных труб, остается незаполненное пространство под сводом, своды рекомендуются выполнять по цепной кривой (катеноиде), свободной от указанных недостатков. Своды круглых печей обычно сферические и опираются на стены, стянутые стальными поясами.

Особое значение приобретает конструкция свода в многоярусных горнах (рис. 147), тем более, что при подовой канализации верхней камеры возрастает статическая нагрузка и температурные напряжения свода нижней камеры.

В своде одноэтажных печей оставляют одно или несколько отверстий для отвода охлаждающего воздуха, которые закрывают шамотными шиберами. В стенах печи устраивают одно или два отверстия «сидва», через которые загружаются и разгружаются изделия. После загрузки печи сидиво заделывают насухо двумя кирпичными стенками толщиной в один кирпич каждая. Наружную поверхность стенок промазывают глиной. Сидиво должно быть вполне герметичным во избежание подсоса воздуха в нижней части печи и недожога низа садки. Размеры сидива должны быть достаточны для свободного прохода рабочих с изделиями и обычно имеют высоту 1,8 м и ширину 0,8 м. При заделке сидива оставляют «глазки» (глядки) для наблюдения за нагреванием изделий и режимом обжига.

т. е. как внутрь печи, так и наружу. Потери на аккумуляцию уменьшаются с уменьшением толщины стен и особенно при применении специального изоляционного кирпича, отличающегося малым объемом весом и малой теплопроводностью. Предел уменьшения толщины стен определяется условиями строительной прочности. Применение изоляционного кирпича уменьшает расход топлива на 10÷15% от общего расхода топлива на обжиг.

Топочные устройства однокамерных печей должны обеспечивать возможность регулировки работы топок в широких пределах сжигания различных количеств топлива в зависимости от кривой обжига, а также получения полугаза в целях переноса процесса горения в рабочую камеру печи.

Для отопления однокамерных печей применяют твердое, жидкое и газообразное топливо. Наибольшее применение имеют твердое и жидкое топливо. Низкокалорийный газ вследствие более низкой температуры горения не всегда дает возможность получить необходимую температуру обжига и для повышения температуры горения необходим подогрев воздуха или газа, что значительно усложняет конструкцию печи. Поэтому он редко применяется для отопления обжигательных печей периодического действия.

В зависимости от рода сжигаемого топлива применяются тот или иной вид топок.

Для сжигания твердого топлива в основном применяются дутьевые топки с горизонтальными колосниковыми решетками и ручным обслуживанием.

Топки в круглых печах располагают симметрично по окружности печи. Количество их зависит от емкости печи и колеблется от 4 до 14. Рассчитывают топки по суммарной площади колосниковых решеток, приходящихся на 1 м³ объема рабочей камеры или 1 м² площади пода печи, а так же исходя из напряжений колосниковых решеток (см. табл. 4 в гл. V).

При обжиге керамических изделий в печах емкостью от 100 до 200 м³ суммарная площадь решеток составляет в среднем до 4,0 до 7,0 м² на 100 м³ емкости печи, или от 15 до 25% площади пода, повышаясь в печах емкостью менее 100 м³ до 10–15 м², что соответствует 25–35% площади пода печи.

При обжиге фарфоровых и фаянсовых изделий суммарная площадь решеток в м²/100 м³ составляет в среднем:

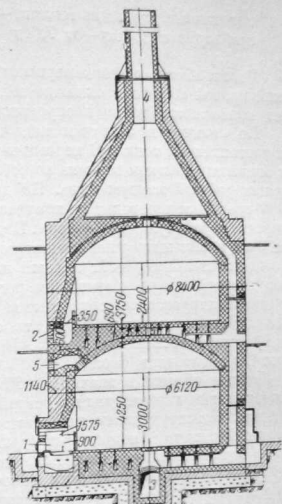


Рис. 147. Двухэтажный горн.

1 — топка для твердого топлива; 2 — топка для жидкого топлива; 3 — дымоход в отдельной стоящую дымовую трубу; 4 — труба, 5 — отвод воздуха при охлаждении горна.

при каменнотопливом топливе—от 4,0 до 8,0,
при торфе и дровах—от 7,0 до 10,0.

Режим обжига в однокамерных печах осуществляется по заданной кривой обжига и охлаждения; фактическая кривая должна по возможности точно воспроизводить заданную.

По окончании загрузки изделий садка печей замазывают и растапливают топку. В первые периоды обжига горение ведется с большим избытком воздуха во избежание неравномерного заполнения рабочей камеры печи. По достижении температуры 600—900° все точки переводят на подугарный режим работы, перенося горение в рабочую камеру печи. Подъем температуры замедляется за счет небольшого уменьшения подачи топлива и воздуха.

Окислительный, нейтральный или восстановительный характер газовой среды достигается регулированием подачи воздуха и контролируется по содержанию CO в газах рабочей камеры печи. При восстановительной атмосфере содержание CO в рабочей камере составляет 2—4%. В нейтральной среде содержания CO составляет около 1%.

Режим обжига в значительной мере зависит от правильной конструкции газоотводящих устройств и правильного их размещения. Конструктивные недостатки подовой канализации, т. е. подовой решетки, подподовых (уравнительных) каналов и дымового бора вызывают неравномерное распределение температуры по горизонтальным сечениям рабочей камеры печи, вследствие неравномерного распределения газовых потоков по объему рабочей камеры. Так как сопротивление садки в однокамерной печи незначительно, указанное явление бывает обычно следствием значительного сопротивления дымового бора и отдельных подподовых каналов по сравнению с сопротивлением подовой решетки. В целях уменьшения неравномерности температур по горизонтальным сечениям рабочей камеры необходимо, чтобы сопротивление подовой решетки было значительно больше сопротивления остальных элементов газоотводящих устройств. Это достигается увеличением сечения дымового бора и подподовых каналов, общим уменьшением сечения отверстий подовой решетки или местным изменением сечений в зависимости от картины распределения температурных полей, полученной на основании измерений температур по объему печи. При этом общая сумма сопротивлений обычно не превосходит 4—5 мм вод. ст. в первые периоды обжига и 10—12 мм вод. ст. в конце обжига.

Для выполнения заданного режима обжига весьма важное значение имеет способ садки изделий в рабочей камере печи.

Садка сырых изделий в однокамерных печах должна быть плотной, прочной и в то же время достаточно пропускаемой для газов. Плотность садки, выражающаяся в кг или т на 1 м³ емкости рабочей камеры печи, различна в зависимости от формы и величины обжигаемых изделий.

Плотность садки (в кг/м³) различных изделий колеблется в следующих пределах.

Нормальный dinasовый кирпич	950—1100
Нормальный шамотный "	850—1000
Простые фасонные изделия	800—900
Сложные фасонные изделия	700—800
Канализационные трубы	250—300
Облицовочные плитки	180
Санитарный фаянс	120
Хозяйственный фарфор	80—100

Приведенная плотность садки не является предельной и общей для всех печей и может быть несколько увеличена за счет рациональной расстановки изделий.

Садка должна быть прочной и устойчивой, чтобы в процессе обжига не происходило завалов и разрушений.

Для равномерного опускания газов и равномерного промывания ими всей массы обжигаемых изделий, а также омывания каждого отдельного изделия со всех сторон, садка должна быть пропускаемой для газов по всему сечению рабочей камеры и не должна закрывать подовые отверстия. При сильно уплотненной садке затрудняется прохождение газов через рабочую камеру. Это увеличивает неравномерность температуры по высоте печи: вызывает недожог в сильно уплотненных местах и пережог в местах редкой садки.

Садка в круглых горнах как при обжиге в капсулах, так и без них, обычно производится сплошными концентрическими кольцами; толщина каждого кольца составляет 0,3—0,5 м, в зависимости от размеров капсулы или обжигаемых изделий. При другом способе садка производится рядами.

При обжиге кирпича садка всегда кладется в перевязку. Принятый способ перевязки должен в точности соблюдаться по всему объему садки. Весьма распространены два вида садки: «в клетку» и «в елку». При садке «в клетку» (рис. 148 а) нижние «в клетку» и «в елку». При садке «в клетку» (рис. 148 а) нижние кирпичи устанавливают на ребро и перпендикулярно им на ребро укладывают верхний ряд кирпичей, что обеспечивает хорошую пропускаемость и в то же время устойчивость и достигает для нормальной садки. Плотность при этом получается наибольшей и достигает для нормального шамотного кирпича 1000 кг/м³. При садке «в елку» кирпичи укладывают на ребро (рис. 148 б) под углом, с промежутками 10—15 мм. В вершине угла, образованного двумя кирпичами, получается промежутки для прохода газов. Второй ряд кирпичей укладывается под углом в другую сторону по отношению к первому ряду. Таким образом, до самого верха печи кирпичи лежат крест-на-крест. При этом способе садка кирпича также достаточно прочна и пропускаема для газов; плотность ее несколько меньше, чем садка «в клетку».

Расход топлива на обжиг различных изделий в однокамерных печах выше, чем в печах других типов, и вызывается периодичностью их работы и связанными с этим большими потерями тепла.

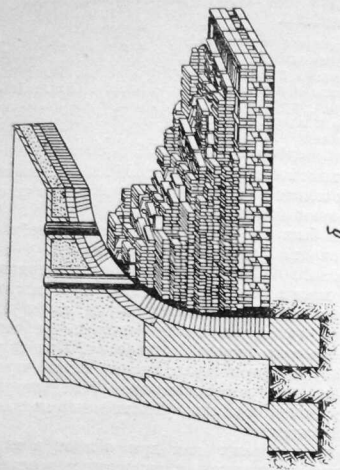
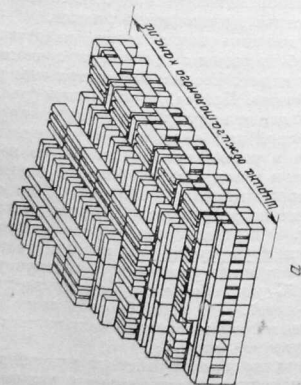


Рис. 148. Садка изделий в камерной печи.
а) «в клетку», б) «в елку».



149

В зависимости от размеров печи, плотности садки изделий и температуры обжига, потери тепла с отходящими газами составляют от 35 до 50%, а потери на аккумуляцию — от 5 до 25%. В сумме это дает 40—75% общего расхода топлива. Несмотря на большое количество тепла, теряемого с отходящими газами, использовать их очень трудно вследствие периодичности работы печи. Попытки блокировки печей закончились неудачно, вследствие трудности улавливания графика работы печей. Наиболее удобно и чаще используется тепло остывающей продукции и кладки печи в период охлаждения. Однако и в этом случае тепло поступает с нагретым воздухом из охлаждающихся камер неравномерно по времени и с перерывами, что затрудняет его использование.

Большие достижения, имеющиеся в настоящее время по изготовлению рекуператоров из жароупорной стали, побуждают к использованию тепла отходящих газов для подогрева воздуха.

Расход тепла на обжиг в значительной мере зависит от размеров печи и температуры обжига.

Средние расходы условного топлива на обжиг различных изделий в однокамерных печах приведены в табл. 41.

Таблица 41
Расход условного топлива на обжиг различных изделий
в однокамерных печах

Обжигаемые изделия	Удельный расход топлива в % веса обожженных изделий	Удельный расход тепла в кал/кг
Шамотный кирпич	20—28	1400—2000
Фасонные кирпичные изделия	30—40	2100—2800
Дипасовые изделия	35—40	2400—2800
Высокоогнеупорные материалы и изоляционный кирпич	35—70	2400—5200
Магнезитовые изделия	50—60	3500—4200
Санитарный фаянс	35—40	2400—2800
Полиной фаянс	15—25	1000—1800

Печи непрерывного действия

В печах непрерывного действия обжигаемые изделия находятся в различных стадиях обжига, начиная от загрузки сырой продукции и кончая выгрузкой обожженного товара. Непрерывность действия печи осуществляется путем перемещения или источника тепла или изделий.

В печах с подвижным огнем, во всех частях рабочего пространства, изделия постепенно проходят все стадии обжига, начиная от загрузки и кончая выгрузкой.

При работе по второму способу обжигаемая продукция ходит все части печи, в каждой из которых устанавливаются

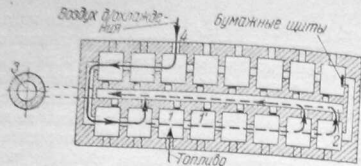


Рис. 149. Схема многокамерной печи.

неизменные по времени условия. Такие печи называют печами с подвижным составом.

Недостаток печей с подвижным огнем заключается в большой трудности механизации загрузки и выгрузки. Этого недостатка лишены печи с подвижным составом, но они гораздо сложнее.

Печи с подвижным огнем подразделяют на две основные группы: многокамерные печи и кольцевые печи. В многокамерных печах все рабочее пространство разделено на ряд камер, каждая из которых представляет собственно периодически действующую камерную печь. Камеры разделены стенками для прохода воздуха и горячих газов. Печь обычно отапливается генераторным газом.

В кольцевых печах рабочая камера представляет один сплошной канал. Для отопления этих печей применяется твердое топливо, которое загружается через отверстия в своде печи прямо в садку, где и сжигается. Эти печи применяют для обжига строительного кирпича. Обжиг в них неравномерен, трудна регулировка процесса обжига и горение протекает с большим избытком воздуха. Несмотря на это удельный расход топлива невысок. С этой точки зрения кольцевые печи очень экономичны.

Многокамерные печи. В многокамерной печи (рис. 149) обжигают изделия в одной из камер 1. Продукты горения проходят из этой камеры в камеры, расположенные впереди, подогревая загруженные в них изделия и, охладившись, удаляются через центрально расположенный дымовой бороз 2 в дымовую трубу 3 или дымосос. Камеры, расположенные позади камеры обжига, остывают. Холодный воздух, поступающий через загрузочные отверстия в крайние камеры, нагревается и, частично, так как для охлаждения требуется больше воздуха, чем для горения, поступает в камеру обжига (находящуюся в камере 1 газ частично отбирается на сушку. По окончании обжига т. е. зона обжига передвигается на соседнюю камеру 1, передвигаются на одну камеру загрузка, выгрузка, подогрев изделий и их охлаждение. При большом количестве камер печь работает на два огня, т. е. обжиг производится в двух далеко стоящих друг от друга камерах, каждая из которых имеет впереди себя несколько камер подогрева, а сзади несколько камер

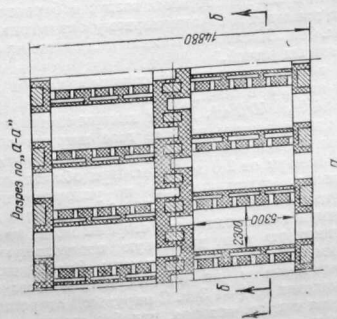
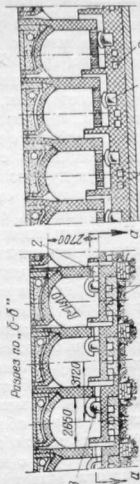


Рис. 150. Многокамерная печь: а — печь с холодным полом, б — печь с горячим полом, 1 — газоходы; 2 — перегородки газов на камеры; 3 — отвод газов в средней камере.

остывания. Обеззольные обжиги следуют друг за другом, постепенно обходя все камеры печи.

По способу отвода газов из рабочей камеры многокамерные печи подразделяют на печи с подовой канализацией и печи с канализацией в стенах (рис. 150а).

В печах с подовой канализацией газы проходят из одной камеры в другую через отверстия, расположенные в поду камеры. Охлажденные газы отводятся через те же подовые отверстия в сборный боров, расположенный ниже подовых отверстий (рис. 150б).

В печах с канализацией в стенах (рис. 150б) газы проходят из одной камеры в другую через систему каналов, выложенных в разделяющих камеры стенах. Отходящие газы отводятся в дымовой боров через каналы, расположенные в средней стене камеры, или через систему специальных каналов, расположенных в поду камеры и соединенных с дымовым бором.

В печах с подовой канализацией распределение температуры по объему достаточно равномерно. Однако эти печи сложны, сильно углублены в землю, подовые отверстия и подовые каналы сравнительно быстро разрушаются и требуют частого ремонта, так как температура газов, отходящих из камеры в период обжига, почти достигает температуры обжига.

Печи с подовой канализацией особенно пригодны для обжига изделий со сравнительно низкой температурой обжига (1100—1250°).

При высоких температурах обжига (обжиг изделий из диоксида или магнетита) и относительно небольшой ширине камеры преимущественно применяются печи с канализацией в стенах.

В период охлаждения изделий холодный воздух опускается на под камеры, в то время как горячий воздух собирается в верхней ее части, что приводит к неравномерному остыванию изделий по высоте камеры. Это обстоятельство является одним из основных недостатков камерных печей.

Число камер в многокамерных печах колеблется от 16 до 32. Емкость одной камеры в печах различных типов различна и колеблется от 14,0 до 40,0 м³. Длина камеры составляет от 4,0 до 6,0 м. При одностороннем подводе газа ширина составляет от 2 до 2,5 м, и при подводе газа с двух противоположных сторон — 4,5 м. Высота камеры от 2,0 до 3,0 м. При обжиге магнетитового кирпичца, высота садки которого по условиям прочности невелика, объем камер составляет 16—20 м³ при высоте до 2,0 м.

В печах с подовой канализацией со стороны входа газов часто выкладывают шамотную или диасовую перевальную стенку высотой до 800 мм над уровнем пода камеры. Внутреннюю часть стен и свода выкладывают из шамота или диоксида; толщина наружных стен доходит до 1—1,3 м. С наружной стороны каждой камеры оставляется садиво, которое, подобно садиву однокамерных печей, закладывается и замазывается после загрузки. Все камеры обычно обвязывают каркасом из швеллерных балок и стальных тяг.

Свод печи обычно изолируют слоем засыпки из шлака, шамота или кизельгура. В своде остается одно или несколько отверстий для отвода горячего воздуха в период охлаждения, а также для переноса воздуха из зоны охлаждения в зону подогрева. Камеры располагаются по обе стороны сборного дымового бора, разделяющего печь на две симметричные половины.

Газ для отопления печи подводится по двум газопроводам, проходящим с наружной стороны камер и соединяющимся с газопроводами к каждой отдельной камере. Подачу газа регулируют при помощи специального шибера или конуса, подъем которого должен плавно регулироваться. Конус или шибер должен плотно закрывать газопровод во избежание просачивания газа. В камеру газ подводится через специальные отверстия в поду или в стенах с одной или с двух сторон камеры. При наличии перевальной стенки газ подводится по каналу под стенку и смешивается с поступающим из соседней камеры нагретым воздухом. В печах с канализацией в стенах газы и горячий воздух чередуются с воздушными, что обеспечивает хорошее перемешивание газа с воздухом. Продукты горения и горячий воздух в печах с подовой канализацией проходят через отверстия, собираются под подовыми каналами и через ряд отверстий, расположенных в фундаментах промежуточных осевок, переходит в соседнюю камеру у основания перевальной стенки. В печах с канализацией в стенах воздух и продукты горения удаляются из камеры через отверстия в нижней части стены, поступают в соседнюю камеру через ряд отверстий в стене канал и направляются в соседнюю камеру через ряд отверстий в верхней и в нижней части стены.

Скорость вылета газа в камеру должна подбираться с таким расчетом, чтобы камера была по всей ширине заполнена потоком пламени. Как и в однокамерных печах, выравнивание температуры по объему камеры достигается регулированием сопротивлений отдельных элементов газопроводящей системы. Сопротивление подовой решетки и в данном случае должно значительно превышать сопротивление подовых каналов. Газопроводящие каналы соединяются с центральным дымовым каналом и отключаются от него дымовыми конусами или задвижками, открытие которых должно плавно регулироваться. В печах с канализацией в стенах отходящие газы через отверстия в нижней части стены камеры проходят в дымовые каналы, расположенные под подом камеры или в фундаменте стены и соединенные с центральным дымовым бором. Сопротивление отверстий в стенах меньше сопротивления подовой решетки, в силу чего общая сумма сопротивлений в печах с канализацией в стенах меньше, чем в печах с подовой канализацией.

В печах с подовой канализацией сопротивление в стенах составляет 1,5—2,5 мм вод. ст., а в печах с канализацией в своде соответственно от 0,5 до 1,0 мм вод. ст. Общее сопротивление в начале зоны подогрева составляет 15—20 мм вод. ст. в печах с подовой

канализацией и 5—10 мм вод. ст. в печах с канализацией в стенах. Разрежение выше 20 мм вод. ст. практически трудно осуществимо и приводит к большим засосам воздуха через неплотности.

В печах с подовой канализацией на подогреве находится от 3 до 5 камер, в печах с канализацией в стенах — от 5 до 7 камер.

В печах с канализацией в стенах изделия подогреваются дольше, чем в печах с подовой канализацией, благодаря чему продолжительность нахождения камеры на обжиге меньше и месячная оборачиваемость печи выше. Если при обжиге шамотных изделий продолжительность нахождения камеры на обжиге в печах с подовой канализацией составляет 20—25 часов и продолжительность одного оборота 16-камерной печи — около 16 суток, то в печи тех же размеров с канализацией в стенах продолжительность нахождения камеры на обжиге сокращается до 15—17 часов и один оборот печи осуществляется приблизительно за 10—11 суток. Таким образом, в первом случае печь оборачивается около двух раз в месяц, а во втором — около трех раз. Благодаря этому многокамерные печи с канализацией в стенах могут дать большую производительность, чем печи с подовой канализацией. Однако в печах с каналами, расположенными в стенах, температура по объему камеры распределяется менее равномерно. В особенно неблагоприятных условиях работы находятся угловые камеры печей, газоходы которых имеют резкие повороты и большую длину, чем остальных камер.

Чтобы улучшить условия обжига, газоходы угловых камер должны иметь минимальные сопротивления движению газов.

Режим обжига в многокамерных печах регулируют при помощи клапанов или конусов, поднимаемых на различную высоту для выпуска продуктов горения в дымовой бор в целях создания надлежащего разрежения в камере, находящейся под газом. Режим остывания изделий регулируют подводом воздуха, избыток которого используется для целей сушки.

Плотность садки изделий в многокамерных печах зависит от рода обжигаемых изделий и достигает 850—900 кг/м³ при обжиге шамотных изделий.

Вследствие значительных колебаний в режиме обжига расход топлива на обжиг сильно колеблется. В печах с канализацией в стенах расход топлива обычно ниже, чем в печах с подовой канализацией.

Ниже приведен расход условного топлива (в % веса обожженных изделий) на обжиг в многокамерных печах различных изделий.

Шамотные шамотные изделия	10—12%	(700—810 кал/кг)
Динасовые изделия	15—20%	(1050—1400 кал/кг)
Канализационные трубы	20%	(1400 кал/кг)

Расход твердого условного топлива, часть которого сгорает в газогенераторе выше указанных величин приблизительно на 30%.

Кольцевые печи. В кольцевых печах (рис. 151) обжигаемые изделия заполняют весь кольцевой канал печи, за исклю-

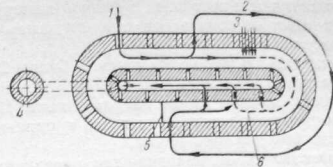


Рис. 151. Схема работы кольцевой печи.
1—воздух для охлаждения; 2—воздух для шмаухования; 3—подача топлива; 4—дымовая труба; 5—бумажные шиты; 6—продукты горения.

чением некоторого пространства, находящегося под загрузкой и выгрузкой. В середине камеры через топливные трубочки, установленные на своде печного канала, загружают топливо, которое горит среди кирпича. Продукты горения проходят в камеры, расположенные впереди находящихся на обжиге, отдают свое тепло загруженному в них кирпичу, охлаждаются и с температурой 150—300° удаляются дымососом.

Воздух поступает в камеры с обожженным кирпичом, расположенные за находящимися на обжиге, охлаждает кирпичи и нагреваясь, проходит в камеры, находящиеся на «большом огне». Так как количество воздуха, требуемое для охлаждения кирпича, превосходит количество, необходимое для сжигания топлива, часть воздуха отбирается в шмаух-канал, отбирает камеры огня и подогрева и подается в самые передние камеры подогрева («камеры шмаухования») для сушки загруженного в них кирпича-сырца. Воздух, нагретый, в зоне охлаждения печи до 200—300°, отдает свое тепло кирпичу-сырцу, остывает и при температуре 100—120° отводится в дымовый канал, где смешивается с охладившимися дымовыми газами и через дымовой бор удаляется в дымовую трубу. По мере окончания обжига кирпича в зоне «большого огня», топливо забрасывается в следующие по ходу газов ряды топливных трубочек, на шмаух-процессе включается следующая камера, а из остывшей камеры в зону охлаждения выгружают обожженный и охлажденный кирпич.

Находящиеся на загрузке камеры расположены впереди камер шмаухования, вследствие чего поступающий через садку воздух всегда стремится проникнуть в камеры шмаухования. Во избежание этого передняя камера шмаухования отделяется от камер, находящейся на загрузке, шитом с наклеенной на него плотной бумаги или просто плотно прижатыми к садке листами бумаги, которые при перемене огня прорываются крючками, пропускаемыми через топливные трубочки, и затем сжигают.

Продукты горения отводятся через специальные отверстия в нижней части обжигаемого канала, отключаемые от дымового канала при помощи подъемных конусов. Идущий на шмауховании воздух подается в специальный шмаух-канал из любой ка-

меры зоны охлаждения и поступает в любую камеру зоны подогрева. Шмаух-канал отключают от рабочих камер при помощи подъемных конусов.

В кольцевых печах с количеством камер более 24—30 обжиг ведется на два огня. В этом случае топливо засыпается в двух местах, отстоящих друг от друга на расстоянии 12—15 камер. Печь имеет по две зоны взара, подогрева и охлаждения, и оба огня постепенно обходят весь канал.

Общее количество камер, находящихся в различных стадиях обжига, зависит от режима обжига изделий. Так, например, при обжиге красного кирпича отдельные зоны обжигаемого канала распределяются следующим образом.

На шмаух-процессе (досушка на парах)	3 камеры
На подогреве (прокурка на дыму)	2—3 »
На обжиге (на взаре)	3—4 »
На выдержке (на закалке)	2 »
На охлаждении	3—5 »
На загрузке, выгрузке и в ремонте	3—5 »

В кольцевых печах можно обжигать кусковые материалы, например: гипс, известь, глину, которые садятся в чень круцими кусками размерами от 200×200 до 400×400 мм, изделия массового производства, не требующие особо тщательного соблюдения режима и высоких температур при обжиге, как, например, строительный и шамотный кирпич, черепицу, а также неответственные огнеупорные изделия среднего веса и несложной формы. Обжиг в них происходит неравномерно и наряду с пережогом материала имеет место недожог.

Кольцевые печи отличаются большим разнообразием конструкции отдельных деталей, однако принцип их работы сохраняется. Обжигательный канал кольцевой печи (рис. 152) выкладывают из красного кирпича и при высоких температурах обжига футеруют изнутри шамотным кирпичом. Высота канала не превышает 2,7—3,0 м, так как при более высоких каналах осложняется загрузка и выгрузка изделий, возникает опасность раздавливания нижних рядов садки и увеличивается неравномерность распределения температуры по высоте канала. Ширина канала колеблется от 3,5 до 5,0 м. Длина обжигательного канала колеблется от 60 до 200 м. При длине канала больше 150 м печь работает на два огня. Толщина стен обжигательного канала составляет 1,2—2,0 м. Объем обжигательного канала составляет от 25 до 40% объема печи по наружному обмеру.

Длина одной камеры обычно обуславливается системой садки изделий. Так, при обжиге красного кирпича длина камеры составляет 5,2 м, исходя из кратности длины стандартного красного кирпича-сырца. В одну такую камеру сажают 20 рядов кирпича или при садке «в елку» — 5 рядов. Под обжигательного канала выравнивается и выстилается щебнем и песком. Садки устраивают в боковых стенах канала, по одному на

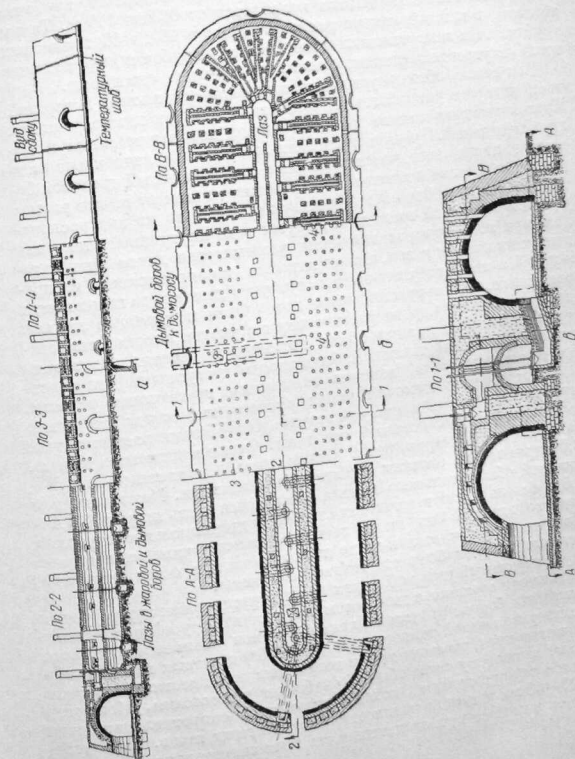


Рис. 152. Кольцевая печь.

каждую камеру, и после садки изделий их тщательно заделывают и промазывают глиной.

В своде обжигательного канала оставляют четырехугольные отверстия, в верхнюю часть которых вставляют круглые чугунные патрубки с крышкой — топливные трубочки. Диаметр отверстий топливных трубочек колеблется от 150 до 200 мм. В зависимости от ширины обжигательного канала поперек его располагают от 4 до 6 трубочек, причем расстояния между их центрами составляют 0,8—0,9 м. Расстояние между центрами трубочек вдоль обжигательного канала колеблется от 0,9 до 1,5 м. Таким образом, в каждой камере располагается от 15 до 40 топливных трубочек. На закругленных частях канала трубочки, проходящие вдоль внутренней стенки, располагают через один ряд.

Над печью обычно устраивают деревянный шатер, в верхней части которого располагаются фонари с открывающимися окнами. Против каждого садва печи оставляют двери для садки и выгрузки изделий. Продукты горения отводятся из печи через окна в стене, подпоровые дымовые каналы и центральный дымовой боров. Окна в стене в зависимости от размеров камеры имеют размер от $0,5 \times 0,5$ до $0,8 \times 0,8$ м. При двух окнах одно из них располагается в наружной стене печи, другое — во внутренней стене, так как при подобном расположении уменьшается длина пути отходящих из камеры газов, а следовательно, и сопротивление их проходу. На закругленных частях печи окна для отвода газов всегда расположены в наружной стене печи. Окна и дымовые каналы до центрального борова рассчитывают с учетом высокой температуры газов. Они должны иметь достаточное сечение во избежание больших сопротивлений, быть вполне доступными для очистки и ремонта и не должны заливаться грунтовыми водами.

Центральный дымовой канал служит для отвода из камер продуктов горения и шмаух-воздуха. Он обычно располагается centrally вдоль большой оси печи. Сечение дымового канала зависит от размеров печи. Стены канала, толщиной в 1,5—2,0 кирпича, не связаны с общей кладкой печи. Между ними и кладкой обжигательного канала оставляется щель шириной 0,4—0,5 м, сквозь которую проходят столбы, поддерживающие стропила печного здания. Эта щель заполняется сыпучим материалом. Для осмотра и чистки в своде дымового канала оставляют лазы, которые должны быть тщательно уплотнены.

Центральный дымовой канал обычно расположен выше уровня пода печи и соединен с дымососом или дымовой трубой при помощи дымового борова с установленным в нем стальным шибером. Вследствие низкой температуры (80—150°) дымовых газов, выходящих из печи, дымовые трубы кольцевых печей достигают высоты 80 м, и поэтому печи обычно снабжают дымососами. Мощность дымососа определяют, исходя из общего сопротивления печи в 20—40 мм вод. ст. и количества отсасываемых газов. При установке дымососа производительность печи значительно возрастает.

Во избежание присосов холодного воздуха, все неплотности в кладке должны быть тщательно устранены.

Шмаух-процесс в современных печах применяется редко. Изделия должны загружаться в печь высушенными, для того чтобы обжиг можно было вести интенсивно. Там, где шмаух-процесс сохранился, подача нагретого воздуха из зоны охлаждения для шмаух-процесса производится различными способами. Наиболее современной является так называемая «рассыпная система», которая заключается в том, что в кладке свода обжигательного канала параллельно поперечным рядам топливных трубочек располагаются жаровые каналы небольшого сечения. Каждый канал соединяется с двумя рядами топливных трубочек и с жаровым конусом. После открытия конуса нагретый воздух движется через топливные трубочки, малые жаровые каналы, сборный жаровой канал и вновь через жаровые каналы в камеру, находящиеся в стадии шмаухования. Преимуществом рассыпной системы состоит в более равномерном распределении нагретого воздуха, недостаток — в неравномерной сушке изделий по высоте садки, так как нагретый воздух поступает сверху вниз и быстро остывает.

Кроме рассыпной системы, в старых печах применяется «очелочная система». В этом случае отбор воздуха производится при помощи жаровых очелков, т. е. двух или четырех отверстий, расположенных в нижней и верхней части камеры и соединенных через жаровые конуса с жаровыми каналами. Недостаток очелочной системы состоит в том, что сырые изделия досушивают главным образом, против жаровых очелков.

Наконец, в старых печах воздух передается из камер охлаждения в шмаух-камеры при помощи железных коробок, которыми перекрывают поперечные ряды трубочек как в камерах охлаждения, так и в шмаух-камерах. Этот способ мало удобен в эксплуатации и страдает теми же недостатками, что и рассыпная система.

Жаровые конуса представляют собой чугунные крышки с кольцами, за которые крышки поднимаются снаружи при помощи стальных штанг.

Садка изделий в кольцевых печах, как и в печах описанных выше конструкций, должна быть плотной, прочной, достаточно прочной для газов и простой в выполнении. При обжиге кирпича-сырца пича плотностью садки называется количество кирпича-сырца вштуках, укладываемого в 1 м^3 объема обжигательного канала; это количество колеблется от 230 до 310 шт. кирпича на 1 м^3 , что составляет от 50 до 67% по отношению к полному заполнению объема обжигательного канала.

При садке красного строительного кирпича топлива и кирпичные дивают толку или решетку для сжигания топлива и кирпичные продольные подовые каналы для прохода продуктов горения.

Продольные подовые каналы для прохода газов и воздуха образуются за счет выкладки «козелков» или «вожков», пред-

ставляющих собой столбики, выложенные из двух или трех штук поставленного на ребро кирпича-сырца и перекрытые перпендикулярно поставленными кирпичами. Промежутки между ножками составляют полкирпича и образуют прямолинейный канал. Против окон для отвода газов из камер между ножками делают разрыв, образующий поперечные каналы для прохода газов в окна. Высота ножек определяется родом сжигаемого топлива. При употреблении высококалорийного малозольного топлива и при достаточном разрежении в печи высота ножек не превосходит размеров одного кирпича, повышаясь при многозольном топливе до 6—7 кирпичей. В последнем случае подовые каналы образуют своего рода зольник, вмещающий всю золу топлива, не препятствующий движению газов и воздуха. Ножки перекрывают кирпичом-сырцом хорошего качества, образующим основание для всей садки. При обжиге красного кирпича большое распространение получила садка «в елку».

Садка кирпича, расположенного под топливными трубочками (садка колодцев), выкладывается иначе и зависит от рода применяемого топлива. Садка колодцев должна образовывать подобные топок, по своей конструкции отвечающих специфическим особенностям сжигания данного вида топлива. При мелкокусовых высокозольных топливах садка должна образовывать ряд ступенчатых колодников, а высокие ножки — достаточно развитый зольниковый объем. При сжигании крупнокусового топлива садку топливных колодцев производят с образованием достаточно развитых колодниковых решеток.

Засыпать топливо через топливные трубочки надо возможно чаще и равномернее, порциями от 1 до 3 кг. Так как горячие газы выбиваются из трубочек, открытых в момент загрузки топлива, то часть тепла теряется. Вследствие выбивания горячих газов условия работы взвешивка вредны для здоровья.

С целью механизации загрузки топлива на топливных трубочках устанавливают загрузочные аппараты, подающие в печь мелко дробленое топливо одинаковыми порциями. Благодаря этому расход воздуха для горения не подвергается резким колебаниям, сечение обжигательного канала более равномерно пронизывается газами и выбивание их через топливные трубочки не имеет места.

Для повышения производительности печи следует всегда стремиться растянуть зону обжига (зону взвара), забрасывая топливо в наибольшее число рядков по длине печи (20—25 рядков). При этом легко воспламеняющиеся виды топлива (торф, корье, опилки) забрасывают небольшими порциями в рядки с наименьшей температурой изделий, а трудно воспламеняющиеся и высококалорийные топлива — в средние (по ходу огня) рядки, где температура изделий достигает 600—1000°. Наконец, в самые передние рядки забрасывается также относительно меньшее количество топлива, так как в них температуру обжига (взвара) нужно только поддерживать.

Сжигание генераторного или естественного газа осуществляют вводя газ в топливный колодец по вертикально установленной шамотной трубе, снабженной по всей высоте рядом отверстий, через которые газ поступает в печь. При этом газ разводит или по верку печи, или же через каналы, располагаемые под подом печи.

Добров и Готлиб предложили выдеить в садке кольцевых печей специальную шахту, в которой газифицируется низкоортное топливо, забрасываемое сверху.

К недостаткам кольцевых печей относится расхождение газов по высоте камеры в зоне охлаждения нередко составляют 300—400°, достигая в зоне подогрева еще больших значений. В целях выравнивания температуры по высоте камеры в зоне обжига стремятся работать с возможно большим числом камер подогрева и устанавливать особые щитки, до известной степени способствующие выравниванию температуры по сечению канала. Тем не менее изделия особо чувствительные к изменениям температуры, предпочтительнее обжигать в одно- или многокамерных печах.

Сопротивление садки в кольцевых печах обычно незначительно и составляет 2,5—3 мм вод. ст. при общем разрежении у дымохода или у основания дымовой трубы около 15—20 мм вод. ст. Наибольшее сопротивление имеют подовые каналы — 60÷80% общей суммы сопротивлений. В кольцевых печах расход условного топлива (в % веса обожженных изделий) на обжиг различных изделий ниже, чем в печах других систем, и составляет

при обжиге шамотных изделий 10÷12% (700÷840 кал/кг),
» » красного кирпича — 3,7÷4,0% (260÷280 кал/кг).

Производительность печи при обжиге красного кирпича составляет 1150÷1250 шт. на 1 м³ обжигательного канала.

Полезный расход тепла в кольцевых печах составляет от 15 до 30% общего расхода тепла, повышаясь при использовании подогретого воздуха и отходящих газов для целей сушки. Наибольшее значение имеют потери с отходящими газами, которые составляют от 25 до 40%. Потери с отходящими газами зависят от количества отходящих газов, которое всегда значительно, так как к продуктам горения примешивается воздух охлажденный в зоне смаухования и значительное количество присосанного воздуха. Подогретый в зоне остывания воздух, нередко используется не только для смаухования, но и для сушки.

Для этих же целей используется тепло отходящих из печи газов, которые подводится к сушилкам по специальному каналу. Суммарное количество тепла отходящих газов и смаух-воздуха вполне достаточно для сушки сырца и при использовании их расход топлива на сушку сокращается. Однако при этом режим работы сушилок оказывается связанным с работой печей.

Печи с подвижным составом (туннельные печи)

Печи с подвижным составом, обычно называемые туннельными, являются наиболее современными печами для обжига керамических изделий. По сравнению с остальными печами обжига керамической промышленности они более экономичны в отношении расхода топлива и потребностей в рабочей силе, в них осуществляется наиболее полная автоматизация процесса обжига и достигается относительно точная его регулировка. Туннельные печи могут работать непрерывно в течение ряда лет без остановок на ремонт.

По форме рабочего канала туннельные печи подразделяются на печи с прямым каналом, кольцевым каналом и П-образным каналом.

В настоящее время наиболее распространены туннельные печи с прямым каналом.

Туннельные печи с кольцевым каналом имеют ряд преимуществ и недостатков по сравнению с туннельными печами с прямым каналом. К преимуществам кольцевых туннельных печей относятся:

- 1) большая плотность пода печи, выполняемого сплошным вместо ряда вагонеток в печах с прямым каналом;
- 2) отсутствие парка вагонеток;
- 3) отсутствие обездных и передаточных путей для вагонеток;
- 4) возможность сосредоточения загрузки и выгрузки в одном или смежных участках.

Недостатками таких печей являются:

- 1) малый фронт работы по загрузке, выгрузке и ремонту врачающегося пода;
- 2) несколько более сложная схема грузовых потоков и в некоторых случаях неудобство размещения круглой печи по сравнению с прямыми печами;
- 3) отсутствие места для охлаждения изделий вне туннеля и, следовательно, необходимость лучшего их охлаждения в печи;
- 4) различные условия нагрева и охлаждения изделий, расположенных у внутренней и наружной стенок печи.

Туннельные печи с П-образным каналом применяются почти исключительно для декоративного обжига фарфоровых изделий, осуществляемого при температурах не выше 1000° и обычно делается муфельными.

Большие перспективы имеют микротуннельные печи, в настоящее время еще не достаточно широко распространенные в нашей промышленности. Простота устройства, дешевизна, большая производительность и постоянно условий обжига делают их весьма удобными и экономичными агрегатами для обжига мелких изделий, допускающих обжиг только в узком интервале конечных температур.

Несмотря на значительное внешнее различие, принцип работы всех видов туннельных печей одинаков, а конструктивные выпол-

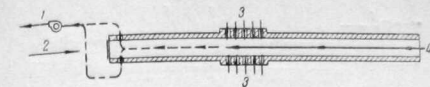


Рис. 153. Простейшая схема туннельной печи прямого действия:

1 — продукты горения; 2 — загрузка; 3 — подача топлива; 4 — воздух для охлаждения и горения.

нение различных узлов печи может быть весьма разнообразное независимо от формы рабочего канала туннельной печи. Поэтому ниже приводится описание принципов работы и конструкций элементов одновременно для всех видов туннельных печей.

Принцип работы и основы конструирования. Принцип работы туннельных печей состоит в следующем. По длинному узкому туннелю печи, навстречу газовому потоку и воздуху, непрерывно движутся плотно сомкнутые друг с другом вагонетки с обжигаемыми изделиями (рис. 153). В зависимости от характера технологического процесса туннель условно разделяется по длине на три основных зоны: подогрева, обжига и охлаждения. Сначала вагонетки с изделиями подогреваются отходящими из зоны обжига продуктами горения, затем проходят через зону обжига, подвергаясь воздействию горячих газов, и, наконец, остывают, отдавая свое тепло омываемому их воздуху и охлаждаемым стенкам туннеля. Туннельные печи работают по принципу противоточка, т. е. газы и воздух движутся навстречу вагонеткам с обжигаемыми изделиями. Передача тепла может осуществляться путем непосредственного соприкосновения теплоносителя с обжигаемыми изделиями или через муфель. В последнем случае газы не поступают внутрь рабочего канала печи и находящийся в нем воздух движется только вследствие естественной циркуляции, вызываемой разностью температур по сечению канала. Принудительное движение газовых потоков осуществляется с наружной стороны муфеля (рис. 154). В этом случае воздух, идущий на охлаждение муфеля, не поступает непосредственно в зону обжига.

Для охлаждения всегда требуется больше воздуха, чем для горения, поэтому часть его отводится для использования на стороне (в сушильках, на обогрев помещений и т. п.), а другая часть, необходимая для горения, подводится к топкам.

Большим недостатком туннельных печей, работающих по схеме рис. 153, является расслоение газовых потоков. Вверху печи всегда имеют место более горячие потоки, внизу — более холодные. Разиме температур между верхом и низом канала особенно резко сказывается в начальный период обжига — в зоне подогрева. Некоторое выравнивание температуры способствует распределению температуры продуктов горения из рабочего канала печи (рис. 155). Лучший отбор продуктов горения из рабочего канала печи, применяемые, по такой схеме работают многочисленные печи, применяемые,

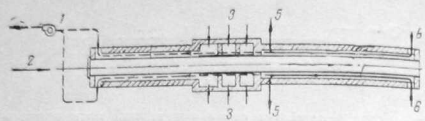


Рис. 154. Схема муфельной туннельной печи:
1—продукты горения; 2—загрузка; 3—топливо; 4—обдуток обдувающего воздуха; 5—воздух для охлаждения.

главным образом, для обжига строительного и огнеупорного кирпича. Печи, работающие по этой схеме, имеют наиболее простую конструкцию и просты в обслуживании. Однако печь работает не вполне равномерно по сечению и температурная кривая по длине печи трудно поддается регулировке. Применение распределенного отбора продуктов горения недостаточно обеспечивает равномерность температур по сечению печи.

Чтобы уменьшить разность температур по сечению печи, повысить скорость прогрева низа садки в начале зоны подогрева, в некоторых случаях нагнетают горячий воздух, отбираемый из зоны охлаждения, в низ садки между загрузочной камерой и отбором продуктов горения, или же осуществляется рециркуляция продуктов горения в той же зоне печи (рис. 153—156).

Существенным недостатком печей работающих по схеме, приведенной на рис. 156, является значительное требуемое разрежение. Это является результатом необходимости просасывания газов через всю печь. При этом через неплотности стыков вагонеток и затворов между подвижным составом и неподвижной кладкой печи подсасывается холодный воздух. Он охлаждает низ садки, вследствие чего еще больше увеличивается разность температур между верхом и низом садки, обусловленная расслоением газовых потоков. В печах больших размеров подсос холодного воздуха так сильно изменяет режим печи, что приходится принимать особые меры для борьбы с ним. Государственным исследовательским керамическим институтом (ГИКИ) предложено и осуществлено создание под помом вагонеток режима давлений, исключающего возможность газового обмена между рабочим каналом и подподовым пространством. Это мероприятие требует установки специальных вентиляторных устройств и уплотнения канала под вагонет-

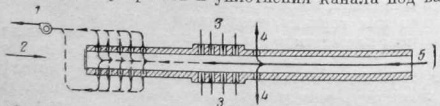


Рис. 155. Схема туннельной печи прямого действия с распределенным отбором продуктов горения:
1—продукты горения; 2—загрузка; 3—топливо; 4—обдуток обдувающего воздуха; 5—воздух для охлаждения.

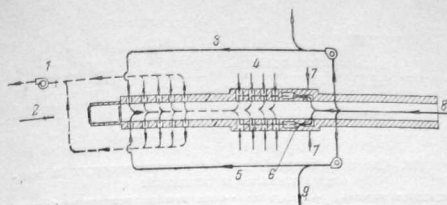


Рис. 156. Схема туннельной печи прямого действия с рециркуляцией горячего воздуха:

1—продукты горения; 2—загрузка; 3—горячий воздух;
4—топливо; 5—эжектор для нагнетания воздуха и топлива;
6—активизирующий воздух; 7—воздух для охлаждения; 8—обдуток обдувающего воздуха.

ками, что несколько усложняет установку и затрудняет обслуживание ее.

Другой метод борьбы с подсосом холодного воздуха через неплотности печи заключается в понижении разрежения в рабочем канале печи. Одним из методов понижения разрежения в рабочем канале печи является нагнетание холодного воздуха в зону охлаждения (рис. 157). В результате этого зона охлаждения печи находится под давлением, а зона подогрева — под разрежением, абсолютная величина которого невелика. Зона обжига, присос к которой холодного воздуха особенно опасен, находится при нулевом давлении, т. е. в наиболее благоприятных условиях. Максимальное разрежение в месте отсоса отработавших продуктов горения примерно в два раза меньше, чем при работе без нагнетания холодного воздуха, следовательно меньше и подсос холодного воздуха.

Нулевое давление в зоне обжига может быть достигнуто без нагнетания холодного воздуха в рабочий канал. В этом случае охлаждение обожженных изделий осуществляется (рис. 158) только рекуперативным путем через охлаждаемые стены печи. Однако, как показала эксплуатация подобных печей, охлаждение при этом получается недостаточным и процесс обжига прихо-

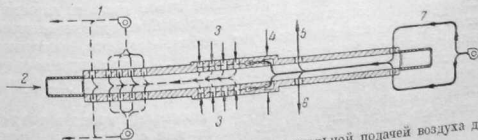


Рис. 157. Схема туннельной печи с принудительной подачей воздуха для охлаждения:
1—продукты горения; 2—загрузка; 3—топливо; 4—активизирующий воздух; 5 и 6—горячий воздух; 7—воздух для охлаждения.

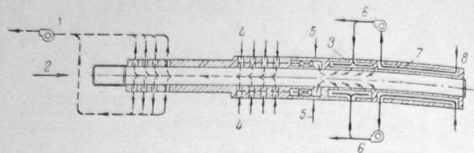


Рис. 158. Схема туннельной печи с рекуперативным и комбинированным охлаждением:

1—продукты горения; 2—загрузка; 3—зона комбинированного охлаждения; 4—топливо; 5—эжектирующий воздух; 6—горячий воздух; 7—зона только рекуперативного охлаждения; 8—воздух для охлаждения.

дится искусственно задерживать, чтобы дать возможность остыть обожженным изделиям. Производительность печи понижается, и зона охлаждения чрезмерно увеличивается. Поэтому печи, работающие по методу только рекуперативного охлаждения, реконструируют, нагнетая воздух в рабочий канал для непосредственного охлаждения обожженных изделий.

Нагнетание в рабочий канал печи холодного воздуха для охлаждения продукции не устраняет неравномерного распределения температур по сечению печи, вызываемого расхождением газовых потоков при их горизонтальном продвижении в рабочем канале печи и лишь частично уменьшает подсос холодного воздуха через неплотности. Хорошим способом борьбы с неравномерностью температуры по сечению печи является предложенное Гипроогнеупором устройство принудительной поперечной циркуляции продуктов горения в зоне подогрева или воздуха в зоне охлаждения, осуществляемые самостоятельными циркуляционными вентиляторами или при помощи централизованного вентилятора (или эжектора), засасывающего газы из различных точек печи и нагнетающего их обратно в печь. В случае применения промежуточной поперечной циркуляции газов уменьшается общий перепад давления по длине печи, необходимый для прохождения газов от топков к местам отбора из печи продуктов горения. В результате этого уменьшается подсос холодного воздуха в рабочее пространство печи.

Применение поперечной циркуляции газов делает излишним установление искусственного режима давлений в подподохов пространстве. Это частично компенсирует усложнение печи, вызываемое установкой циркуляционных вентиляторов. Уменьшению неравномерности температур по сечению печи способствует увеличение количества циркулирующих в печи газов.

Во избежание расхождения скорости движения газов в туннеле должна быть выше 1—1,5 м/сек. Повышение скорости движения газов может быть достигнуто сокращением свободных сечений для прохода газов при более тесной садке, а также увеличением количества циркулирующих газов при применении рециркуляции

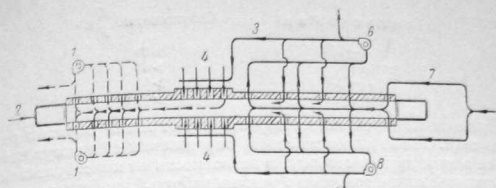


Рис. 159. Схема туннельной печи с рециркулирующей охлаждающей воздухом и продуктами горения:

1—продукты горения; 2—загрузка; 3—воздух для горения; 4—топливо; 5—вихревой охлаждающий воздух; 6 и 8—циркуляционный вентилятор; 7—воздух для охлаждения.

продуктов горения в топке печи. При этом достигается возможность работы при высоком подогреве воздуха и пониженном коэффициенте избытка воздуха. Вследствие этого повышается коэффициент полезного действия печи при одновременном увеличении количества циркулирующих продуктов горения. На рис. 159 приведена схема печи, в которой применена поперечная циркуляция, осуществляемая с помощью вентилятора.

По длине туннельной печи должен быть создан определенный температурный режим. При обжиге многих керамических материалов должен быть выдержан не только температурный, но и газовой режим. Следовательно, на отдельных участках по длине туннельной печи должны быть различные газовые и температурные режимы. Достигается это соответствующим распределением по длине печи точных движения газовых потоков на отдельных участках схемы движения газовых потоков на отдельных участках печи, т. е. как конструктивными, так и режимными мероприятиями. Принудительная поперечная циркуляция весьма облегчает установление любого режима по длине печи. Поэтому при обжиге изделий, требующих в отдельные периоды обжига различных скоростей изменения температуры, характера газовой среды и выдержек при определенных температурах, применяют печи с принудительной поперечной циркуляцией.

Габариты. Создание различных режимов по сечению печи, причем можно без некоторого различия режима по сечению печи. Поскольку это будет тем больше, чем больше сечение печи. Поэтому этому между длиной печи и ее сечением должна существовать определенная зависимость, отклонение от которой приведет к нарушению требуемого режима обжига в отдельных участках печи. На основании анализа работы существующих печей эта зависимость характеризуется следующими соотношениями между сечением (F в m^2) и длиной печи (L в m).

Сечение печи F в m^2

3—4
1,5—2
0,5—1,0
<0,1

Соотношение $\frac{L}{F}$, m^{-1}

>30
>40
>60
>80

Приведенные соотношения характеризуют лишь порядок размеров печи. Они не являются строго определенными и могут изменяться в ту и другую сторону, в зависимости от конструктивных особенностей печи и требуемого режима работы. Чем больше длина печи, тем легче создать на различных участках требуемый температурный и газовый режимы, так как переход от одних температур к другим или от одного состава газов к другому происходит более плавно, с небольшим изменением по длине. Однако с увеличением длины печи увеличиваются сопротивления на пути газовых потоков. Это вызывает необходимость работать при повышенных давлениях или сооружать специальные устройства, облегчающие продвижение газовых потоков. Вредное влияние повышенных сопротивлений в печи проявляется в увеличении потерь горячих газов и подсоса холодного воздуха через неплотности, что снижает температуру обжига, создает повышенную неравномерность режима по сечению и т. п. Кроме того, стоимость печи возрастает почти пропорционально увеличению длины. Пропорционально увеличению длины печи увеличивается и площадь здания, занимаемого печной установкой. Поэтому следует выбирать длину печи минимально допустимую при данном сечении, без ущерба для требуемого режима. Увеличение сечения печи мало отражается на ее стоимости и почти совсем не сказывается на занимаемой площади. Однако, чем больше сечение печи, тем значительнее неравномерность режима по сечению ее и, следовательно, тем больше должна быть общая продолжительность обжига.

Зависимость между сечением туннельной печи и продолжительностью обжига различных материалов видна из рис. 160.

С точки зрения режима обжига наиболее выгодна печь, сечение канала которой равно площади, достаточной для пропуска только одного изделия. При этом можно достичь наилучших условий теплообмена и сократить продолжительность обжига до минимума. Этот принцип осуществлен в микротуннельных печах, в которых обжигают изделия однородные и одинакового размера, например, автобусы. Сечение рабочего канала доходит до $0,01 \div 0,02 m^2$, а длина печи — до $5 \div 6 m$ и даже еще меньше.

Различные мероприятия, уменьшающие неравномерность режима по сечению печи, как-то: поперечная циркуляция, увеличение скорости циркулирующих газов, соответствующая ставка изделий, при которой в местах с наихудшими условиями теплопередачи создаются наиболее легкие условия для прохождения газов и тому подобные мероприятия позволяют уменьшить зависимость продолжительности обжига от размеров поперечного сечения печи

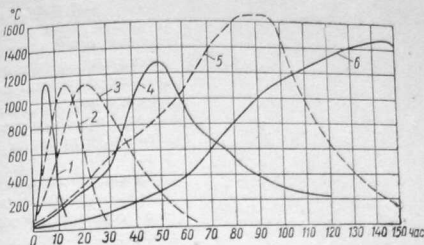


Рис. 160. Кривые обжига керамических изделий:

1—хозяйственных изделий в туннельной печи шириной 0,50 м, 2—тоже в туннельной печи шириной 1,5 м, 3—тоже в камерной печи емкостью 60 м³, 4—шамотного пористого кирпича в камерной печи емкостью 40 м³, 5—магнезитового кирпича в туннельной печи, 6—диносаовый кирпича в камерной печи емкостью 63 м³.

и повысить максимальные экономически целесообразные размеры печи. Максимальная ширина туннельной печи для обжига изделий грубой керамики достигает 3,0 м, а для обжига тонкокерамических изделий—2,2 м. Высота (h) рабочего канала печи, если она не определяется габаритами обжигаемых изделий, обычно делается несколько меньше ширины (b): $h \approx 0,8 b$.

Длина рабочего канала достигает 140—160 м. Однако, как выявилось в процессе эксплуатации ряда печей, при указанных предельных сечениях печи такая длина излишне велика и может быть с успехом ограничена 100—120 м.

Соответственно диаметр (по средней оси пода печи) кольцевых туннельных печей лежит в пределах от 2 до 40 м. Наиболее распространены печи диаметром $14 \div 20 m$. Разрыв между разгрузочным и разгрузочными концами печи должен быть достаточным для выполнения загрузки, разгрузки и ремонта подвижного пода печи и обычно составляет $\frac{1}{4} \div \frac{1}{2}$ развернутой длины печи.

Общая длина рабочего канала П-образных печей составляет обычно 20—25 м.

Устройство. Туннельные печи можно отоплять твердым, жидким и газообразным топливом.

Сжигание твердого топлива может быть осуществлено непосредственно в садке, как, например, в кольцевых печах с неподвижной стенкой и в специальных топках.

При сжигании в садке загружают твердое топливо через отверстия в своде печи в зоне обжига. Отверстия располагают в несколько рядов по длине печи. В каждом ряду имеется 2—3 и более отверстий в зависимости от ширины печи. Загрузка топлива непосредственно в садку вагонеток дает возможность строить печи

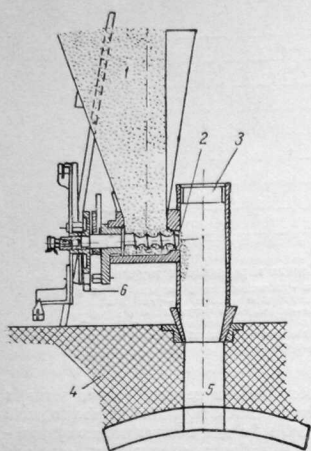


Рис. 161. Автоматический питатель для твердого топлива:

1—бункер для топлива; 2—черпак, подающий уголь в ожедок; 3—двигатель; 4—печь, 5—ожедок; 6—зубчатое колесо.

низкая температура (порядка 1000°), режим работы почти не поддается регулировке, качество обжига неравномерное и т. д. Поэтому в них нельзя обжигать ответственные изделия, требующие определенного режима. Однако простота конструкции печи и небольшой удельный расход тепла на обжиг оправдывают применение таких печей для обжига строительного кирпича и черепицы, не требующих строго установленного режима и обжигаемых при сравнительно невысоких температурах.

При отоплении туннельных печей твердое топливо можно сжигать в выносных топках любой конструкции из числа применяемых для этого топлива. На рис. 162 показан разрез зоны обжига туннельной печи, оборудованной выносными топками для твердого топлива с ручной загрузкой. Продукты горения из точечного пространства поступают в боковые каналы, параллельные рабочему каналу печи и соединенные с ним рядом отверстий. Таким образом, при небольшом количестве топок осуществляется распределенный подвод продуктов горения в рабочий канал печи. При сосредоточенном подводе продуктов горения могут иметь место резкие повышения температуры в местах ввода продуктов горения в печь

любой ширины, ограничиваемой лишь возможностью сооружения соответствующих вагонеток и транспортировки их. Расстояние между рядами делается кратным длине вагонеток, порядка около 1 м.

В садке делают вертикальные колодцы, в которые сыпается топливо. Решетки, составляющие стены колодцев, выкладывают так, что некоторые кирпичики выступают внутрь колодца для распределения топлива на различных уровнях.

Топливо через топочные отверстия обычно загружают автоматически при помощи питателей (рис. 161). Ручная загрузка применяется редко. Печи на твердом топливе работают с большим избытком воздуха, в них развивается сравнительно

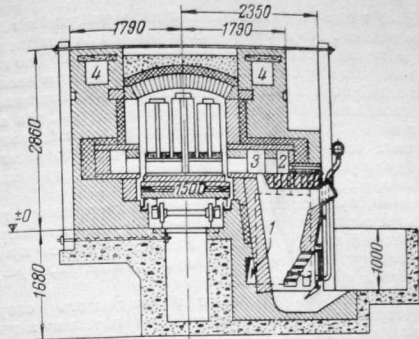


Рис. 162. Разрез зоны обжига туннельной печи на твердом топливе:

1—воздухоход; 2—вторичный воздух; 3—газовоздушный канал; 4—воздухопровод горячего воздуха.

и пережог изделий. Температура обжига в таких печах достигает 1150° .

Вычищать золу из топок для твердого топлива следует не одновременно во избежание значительных нарушений режима работы печи.

В туннельных печах можно применять топки с механизированной подачей топлива.

При отоплении твердым топливом неизбежен унос золы в рабочее пространство печи и засорение товара, подавание в рабочий канал частиц несгоревшего топлива, в особенности при загрузках топлива в печь и шуровке колосников. Режим работы топок не равномерен и изменяется не только в период между чистками, но и в период между загрузками топлива и шуровкой колосников. При отоплении твердым топливом туннельные печи утрачивают ряд преимуществ перед другими печами, а именно: постоянство условий работы, возможность максимальной автоматизации процесса обжига, получение одинакового качества продукции как по сечению печи, так и по времени и т. д.

Все это делает твердое топливо вообще мало приемлемым для обжига туннельных печей и совсем неприемлемым при обжиге продукции, требующей строгого соблюдения температурного и газового режима обжига. Твердое топливо применяется в туннельных печах для обжига строительного кирпича, черепицы, при сильном обжиге хозяйственного фаянса и в муфельных печах при низких температурах обжига.

Наиболее приемлемы для отопления туннельных печей газ и жидкое топливо. Газ в некоторых случаях жигают непосредственно в рабочем канале печи. В этом случае газ обычно подается с боков в нижнюю часть садки. Для этой цели в садке делают разрывы шириной до 1 м, в которме и подается газ. Смешиваясь с поступающим из зоны охлаждения горячим воздухом, газ сгорает.

Такие печи обладают в известной мере недостатками печей, отапливаемых твердым топливом с непосредственной загрузкой его в садку изделий. Поэтому их применяют только в производстве строительного кирпича и черепицы.

Требования, предъявляемые к организации процесса горения в туннельной печи, зависят от различных причин: конструктивных особенностей печи, прерывного или непрерывного продвижения изделий через печь, рода обжигаемых изделий, требуемого состава газовой среды и т. п.

Все эти требования вызывают необходимость сооружать топочные устройства различных типов. Применительно к туннельным печам различают топки: полного сгорания, неполного горения и с излучающими поверхностями.

Топки полного сгорания, называемые обычно камерными, устраиваются, когда температура обжигаемых изделий, в месте вылета продуктов горения из топок, ниже температуры воспламенения и, следовательно, возможно затухание пламени. Эти топки применяют также в тех случаях, когда требуется при помощи продуктов горения, поступающих из топок, дожечь горючие газы в рабочем пространстве печи, изменить восстановительную среду на окислительную или если обжигаемые изделия не допускают соприкосновения с острым пламенем. При отоплении жидким топливом, когда устройство большого числа самостоятельных топок затруднительно из-за малых расходов горючего, в каждой топке применяется распределенный выход продуктов горения из общей топочной камеры в рабочее пространство. Кроме того, в печах малых размеров горелки и форсунки, применяемые в топках полного горения, должны давать короткий и широкий факел. Хорошие результаты дают инжекционные горелки. Однако можно применять и другие горелки, например, горелки предварительного смешения, турбулентные и другие коротко пламенные горелки.

На рис. 163 приведена туннельная печь системы ГИКИ для обжига технического фарфора, оборудованная камерными топками с инжекционными горелками.

Газ, нагнетаемый в печь через горелку, инжектирует горячий воздух, смешивается с ним в диффузоре и, поступая в топочную камеру, сгорает. Чтобы создать в топке устойчивый очаг горения и чтобы продукты горения более равномерно поступали в рабочий канал печи, топочную камеру отделяют от рабочего канала огнеупорной решеткой. Во избежание выпучивания решетки внутрь печи ее следует выкладывать, несколько отступая от внутренней поверхности боковых стен и делать вогнутой во внутрь топки.

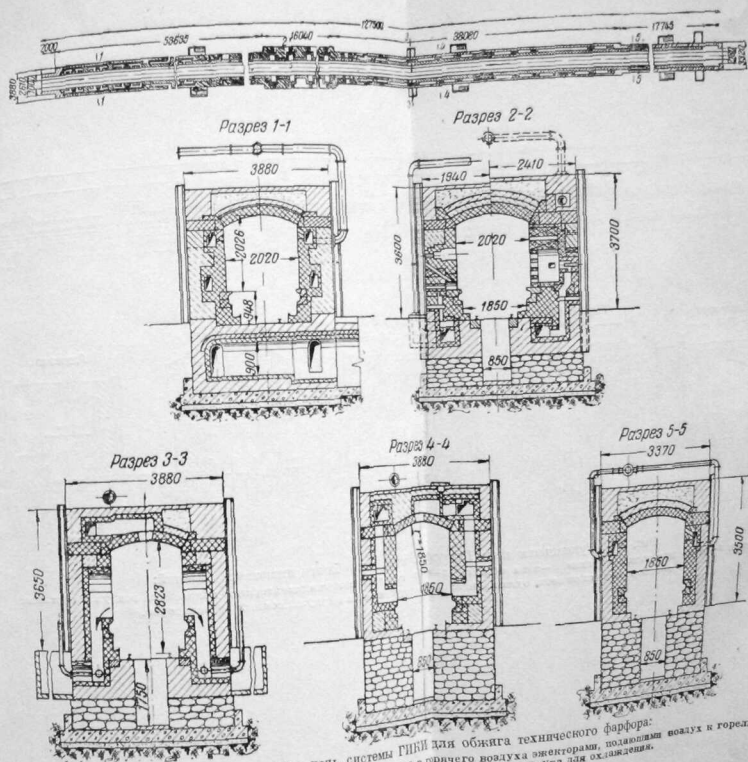


Рис. 163. Туннельная печь системы ГИКИ для обжига технического фарфора: 1—зона подогрева; 2—печные и камерные топки; 3—отбор горячего воздуха эжекторами, подводящим воздух к горелкам; 4—рециркуляция в зоне охлаждения; 5—нагнетание холодного воздуха для охлаждения.

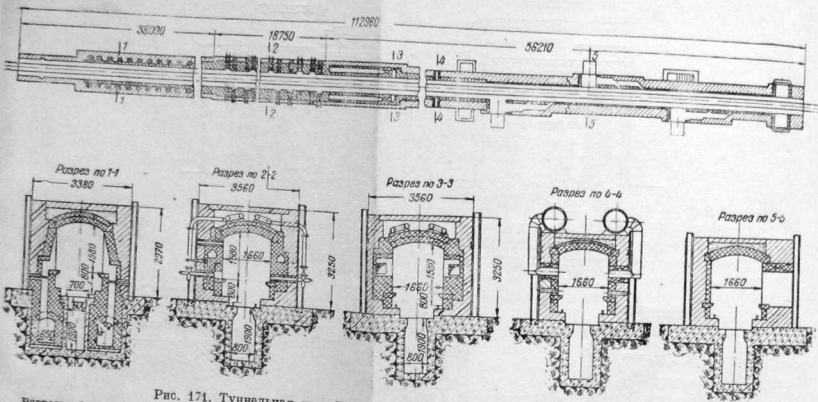


Рис. 171. Туннельная печь Гипрогнестора для обжига шамотных изделий:
 Разрез: 1—отбор продуктов горения; 2—вона обжига; 3—отбор горячего воздуха эжекторами, подающими воздух и горелкам;
 4—отбор воздуха на зоны охлаждения; 5—место установки циркуляционных вентиляторов.

На рис. 164 показана другая конструкция камерной топки. Воздух и газ подводятся к топке узкими каналами 1 и 2, расположенными в шахматном порядке.

В некоторых печах решетка, отделяющая топку от рабочего пространства печи, представляет собой сплошную решетчатую стенку. Решетчатая стенка должна обеспечивать равномерный прогрев обжигаемых изделий по всему сечению печи. Однако применение решетки вызывает увеличение топочного объема, ведущее к повышению тепловых потерь, а сама решетка недостаточно устойчива, что может вызвать необходимость преждевременной остановки печи на ремонт.

На рис. 165 представлена камерная топка малогабаритной туннельной печи. Продукты горения поступают из топочной камеры 1 в рабочее пространство печи 2 через ряд отверстий 3 в боковых стенках печи.

Отдельные топки располагают одну против другой по обе стороны печи и в шахматном порядке, т. е. топка с одной стороны устанавливается против простенка между топками с другой стороны. Однако шахматное расположение имеет ряд недостатков: неравномерность условий обжига на противоположных сторонах печи, неудобство размещения креплений печи и т. д. Поэтому в настоящее время топки располагают преимущественно одну против другой. Расстояние между топками в зоне обжига делают возможно меньшим, оставляя лишь конструктивно необходимый простенок между ними. В зоне подогрева расстояние между топками делается больше. Футеровку топок предпочтительно делать из dinasового кирпича, который в условиях работы непрерывно действующих туннельных печей очень стоек.

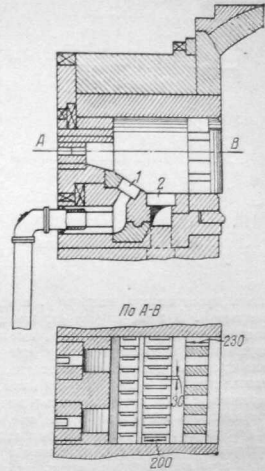


Рис. 164. Камерная топка при газовом отоплении:
 1—газовая печь; 2—воздушная печь.

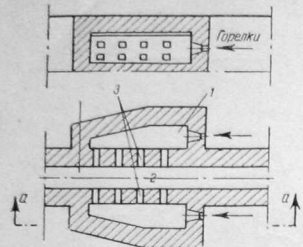


Рис. 165. Камерная топка малогабаритной печи.

делей пространство, например, промежутков между садкой двух вагонеток. В этом случае определяется и способ продвижения изделий через печь. Для того, чтобы пламя из топок всегда поступало в пространство между садкой двух вагонеток, последние должны находиться в неподвижном состоянии, т. е. продвижение изделий в печи должно быть прерывистым, большую часть времени весь подвижный состав в печи должен быть неподвижным, перемещаясь только во время ввода в печь очередной вагонетки. Такие топки могут устраиваться с вылетом газов не только в межсадочное пространство, но также и в «развитой» под вагонеток. Для этой цели под вагонеток, на уровне которого устраивается вылет из топок, выкладывают в виде ряда сообщающихся каналов, в которые попадают газы из топочных отверстий и, распределяясь равномерно по всей площади вагонетки, догорают, равномерно обогревая весь объем садки.

Прерывное движение поезда вагонеток в печи имеет ряд недостатков. Во время продвижения состава нарушается установившийся режим работы печи. При быстром передвижении вагонетки резко изменяется температура, соответственно перепаду ее на длине одной вагонетки. За время стояния поезда происходит заедание подшипников вагонеток, спекание кладки вагонеток или изделий с неподвижной кладкой печи в случае образования плака и другие явления, вызывающие необходимость в большом усилии для трогания с места подвижного состава. Последнее вызывает необходимость установки мощных толкателей, устройства прочных вагонеток, может вызвать преждевременную порчу путей и т. д. Устройство вылета газов из топок в «развитой» под вагонеток при соответствующей планировке каналов последнего позволяет применять и в этом случае непрерывное продвижение изделий через печь.

При топках неполного горения, называемых обыкновенно целевыми, в рабочем пространстве печи поступают продукты неполного горения. Такие топки применяют при необходимости выравнять температуры по сечению печи, использовать воздух, прорывающийся из зоны охлаждения в зону обжига и подсасываемый в рабочий канал через стыки вагонеток и другие неплотности печи.

Эти топки располагают таким образом, чтобы против пламенного вылета приходилось свободное от садки из-

Топки с излучающими поверхностями (муфельные печи) применяют в тех случаях, когда в продуктах горения содержатся негоревшие твердые частицы, зола и т. п., оказывающие вредное влияние на обжигаемые изделия, или когда продукты горения могут реагировать с обжигаемыми изделиями (декоративный обжиг фарфора).

Передача тепла обжигаемым изделиям только путем лучеиспускания от раскаленных стен печи ограничивает размеры поперечного сечения печи. При сечениях выше 1×1 м² получается большая неравномерность распределения температуры по сечению, которую нельзя выровнять теплообменом при естественной циркуляции воздушных потоков внутри камеры печи. Усиление циркуляции воздуха внутри камеры позволяет увеличить ее предельные габариты.

Материалом для муфели должны служить высокотеплопроводные и термостойкие огнеупорные материалы (карборунд, корунд и др.), но очень часто его изготовляют из шамота. При низкой температуре обжига, например, при декоративном обжиге фарфоровых изделий можно применять муфели из чугула и жароупорной стали.

Принцип радиационного теплообмена в рабочей камере печи может быть осуществлен не только путем передачи тепла из топочной камеры в рабочую камеру через разделяющую их стенку, но и путем сжигания газа в горелках поверхностного горения, в которых сжигание газа осуществляется в очень малых объемах у поверхности огнеупорной футеровки печи. При этом стенка печи раскаляется и служит основным источником передачи тепла изделиям. Продукты горения, поступаая в рабочем пространстве печи, также участвуют в передаче тепла изделиям, однако в малой степени. Вследствие этого в таких печах распределение температуры по сечению более равномерное, чем в муфельных печах.

Радиационная горелка показана на рис. 166. Смесь газа и воздуха поступает в приемную коробку 1 горелки и по керамической трубке 2 направляется в печь. На выходном отверстии трубки установлен насадок 3, имеющий большое количество мелких струйных насадок 4, через которые газовая смесь мелкими струйками поступает в печь и сгорает. Для улучшения смешения газовой смеси на футеровочном камне 5 устроены канавки в направлении, перпендикулярном к направлению движения газовой струи. Холодный конец трубки 2 соединен с приемной коробкой 1 посредством пружин, могущих компенсировать тепловое расширение трубки 2, не нарушая плотности в установке горелки.

Такие горелки устанавливают в печи, на расстоянии 300 мм друг от друга, благодаря чему создается сплошная раскаленная стенка. Установка таких горелок в печи показана на рис. 167. При применении радиационных горелок расход газа значительно сокращается, поэтому они получили довольно значительное распространение.

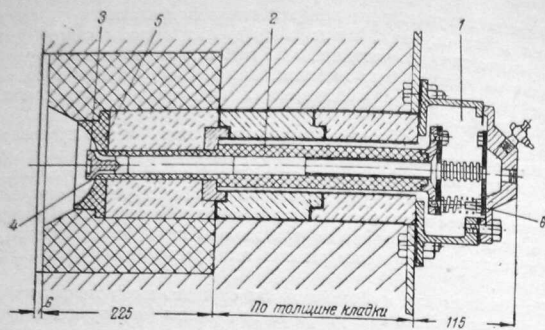


Рис. 166. Радиационная газовая горелка.

На рис. 168 показана микротуннельная печь на жидком топливе для обжига фарфоровых изоляторов при температуре 1400° . Печь имеет длину около 16 м и разделяется на шесть зон. Производительность печи около 1000 шт. изоляторов в сутки. Продолжительность обжига около 2 час. 10 мин.

На рис. 169, 170 показаны туннельные муфельные печи для декоративного обжига фарфора.

На рис. 171 (см. вклейку) показана туннельная печь для обжига огнеупоров.

Транспорт обжигаемых изделий. Обжигаемые изделия транспортируют через печь на специальных вагонетках. Вагонетки состоят из металлической рамы (клепаной, сварной или литой), опирающейся при помощи букс на оси с насаженными на них колесами. Для защиты от воздействия высокой температуры металлическая часть вагонетки защищена огнеупорной футеровкой толщиной 300—400 мм. В зависимости от температуры обжига верхний слой футеровки делается из хромомagnesита, дианса или шамота. Для уменьшения толщины футеровки и веса вагонетки для футеровки применяется теплоизоляционный трепельный или легковесный кирпич и иногда футеровку делают поллой.

При обжиге до температуры 1100° (обжиг строительного кирпича, фаянса) значительное увеличение срока службы футеровки вагонеток достигается при применении моновитных подов из огнеупорного цемента.

Для создания герметичности между вагонетками и печью устраивают песочные затворы по всей длине печи. К боковым сторонам рамы вагонеток прикрепляются железные листы — фартуки песочного затвора. Эти фартуки должны равномерно погружаться в песочный затвор при прохождении вагонетки по всей длине

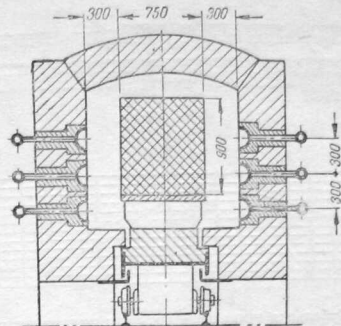


Рис. 167. Установка радиационных газовых горелок.

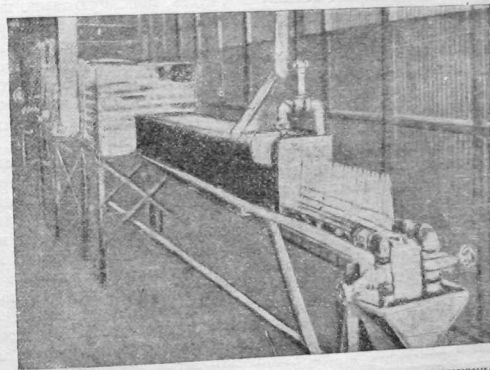


Рис. 168. Общий вид микротуннельной печи со стороны выгрузки

печи. Песок из затворов частично выдувается, частично перемещается по направлению движения вагонетки. Поэтому его необходимо постепенно восполнять через специальные отверстия в кладке печи, располагаемые примерно через каждые 10 м.

Так как фартуки песочного затвора могут находиться в соприкосновении с продуктами горения, а следовательно корродировать

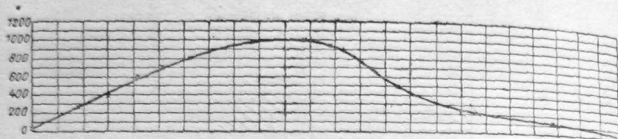
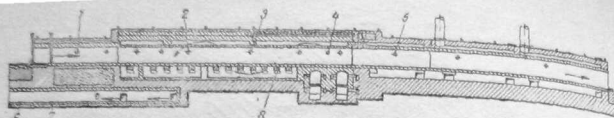


Рис. 169. Муфельная туннельная печь для декоративного обжига:
1—6—пирометры; 6,7—газоанализаторы; 8—тягачер.

и портиться, их делают съемными и часть, лежащую выше песочного затвора, футеруют огнеупорным кирпичом. Для предохранения их от непосредственного действия лучистой теплоты в зоне обжига, а также для создания сопротивления прохождению газов, между кладкой стен печи и футеровкой вагонеток делается лабиринтовое уплотнение. Для более удобного ремонта, выступающие части лабиринтовых уплотнений лучше делать на вагонетках, а выемку — в кладке печи.

Во избежание быстрого износа печи, футеровку выступающих частей лабиринтовых уплотнений на вагонетке надо делать из более легко истираемых огнеупоров, чем поставленные в кладке печи.

Зазор между неподвижной кладкой печи и футеровкой вагонетки сверху составляет от 20 до 50 мм и в среднем 35 мм. Книзу этот зазор делается шире для того, чтобы попавшие в него обломки или иные твердые куски свободно проваливались в желоб песочного затвора, не создавая трения и не истирая футеровки.

Для создания герметичности между вагонетками футеровка торцов вагонеток также имеет лабиринтовое уплотнение. Для большей плотности в паз одной вагонетки закладывается жгут из сырой шмотной массы или асбестовый шнур, который сдавливается при проталкивании вагонеток и заполняет все неплотности. Вагонетки должны плавно и легко передвигаться в печи, поэтому колеса их обычно устанавливаются на шариковых или роликовых подшипниках. Так как вагонетки работают в условиях высоких температур зоны обжига, причем температура подшипников достигает 150°, смазка их должна быть достаточно устойчива при этих температурах, не возгораться и не воспла-

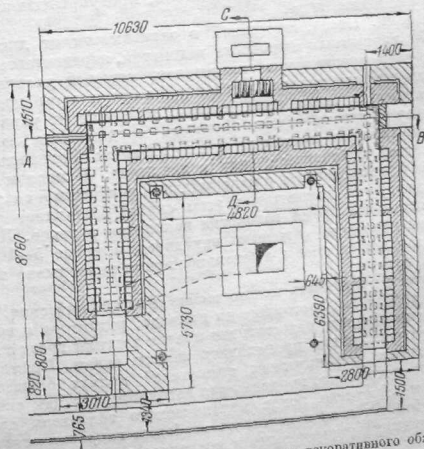
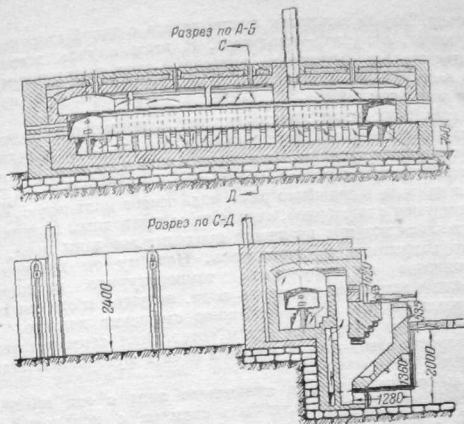


Рис. 170. П-образная муфельная печь для декоративного обжига.

меняться. Бегуны вагонеток лучше делать с одной стороны двухребордными, с другой — гладкими. В этом случае достигается большая точность установки, рельсовые пути подвержены меньшему износу и не так сильно разворачиваются при передвижении вагонеток.

В кольцевых печах вместо вагонеток применяют подвижную под из кольцевой рамы, футерованной так же, как и вагонетки в печах с прямым каналом. Рама подвижного пода печи устанавливается на кольцевом рельсе, катящемся по бегуну.

Для привода в движение рама пода имеет кольцевую рейку, сцепляющуюся с шестерней, связанной с приводным механизмом. Вращающийся под при вращении проходит все зоны печи, попеременно нагреваясь и охлаждаясь. Поэтому он претерпевает неравномерное по окружности температурное расширение, вызывающее изменение размеров пода, ведущее к его смещению от нейтральной оси. Это неизбежное смещение должно быть учтено при постройке печи путем оставления соответствующих зазоров между неподвижной кладкой печи и футеровкой подвижного пода.

Во избежание смещения кольцевого пода с оси вращения, приводной механизм должен быть сцеплен с кольцевой рейкой в двух диаметрально противоположных точках. Кроме того, должны быть устроены ограничители, предупреждающие возможные смещения пода.

Толкатели. Поезд, состоящий в зависимости от длины печи из 30—70 груженых изделиями вагонеток, передвигается вдоль туннеля печи специальным толкателем, который располагаете сбоку или впереди туннеля у входной камеры зоны подогрева.

Проталкивать поезд надо плавно, медленно и равномерно, во избежание завала садки. Скорость продвижения вагонеток в туннельных печах составляет от 1 до 2,5 м/час. Вагонетки могут передвигаться периодически или непрерывно. В первом случае вагонетки надо продвигать с максимальной допустимой скоростью. Период движения вагонеток в этом случае составляет от 4 до 8 мин., остальное время вагонетки находятся в покое. При непрерывном движении вагонетки находятся в покое 5—10 мин., необходимые для их смены, а остальное время непрерывно продвигаются в печи.

Толкатели могут быть механические и гидравлические. Механические толкатели, состоящие из привода, редуктора и толкающего приспособления, недостаточно плавно трогают поезд с места, вследствие чего могут происходить завалы садки. Кроме того, при установке механических толкателей нельзя осуществить принцип непрерывного продвижения вагонеток, так как скорость прямого и обратного ходов механического толкателя связана между собой. От этих недостатков свободны гидравлические толкатели, успешно применяемые в последнее время на всех вновь строящихся установках туннельных печей.

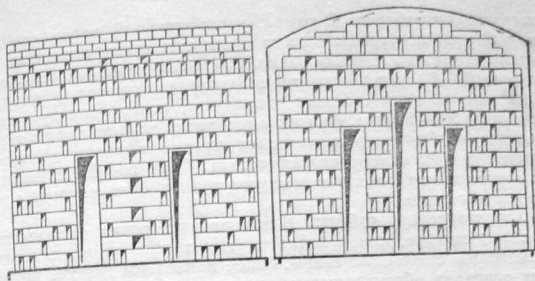


Рис. 172. Садка кирпича в туннельных печах.

С работой толкателя обычно блокируется подъем и опускание шиберов входной камеры.

Садка изделий. Садка изделий должна быть прочной, плотной и провишаемой для газов. Эти три условия при обжиге в туннельных печах должны соблюдаться более строго, чем в печах с неподвижной садкой. Прочность и устойчивость садки приобретают особое значение потому, что при завале изделий не только нарушается режим процесса обжига, но фактически растранивается вся работа печи, так как заваливается садка закупоривается туннель и нарушается транспорт газового канала или через расцепляют поезд вагонеток и через смотровой канал или через проемы в кладке боковых стен разгружают туннель от завала.

Садка должна быть равномерно провишаемой для газов как по длине, так и по ширине, чтобы скорости газового потока на сечении рабочей камеры были по возможности одинаковы. Так как основная масса горячих газов всегда стремится заполнить верхнюю часть канала, садка в верхней части выполняется более плотной, чем в нижней части вагонетки. Такая садка кирпича показана на рис. 172.

Возможность тонкой регулировки процесса горения в туннельных печах и сравнительно небольшие сечения их делают возможным применение бескапельного обжига таких изделий, обжиг которых без капель в других печах невозможен. При бескапельной садке облицовочных плиток для бескапельной загрузки на вагонетку на 40% больше, чем при капельной.

Плотность садки в туннельных печах несколько больше, чем в камерных. Однако вследствие неблагоприятного соотношения между поверхностью стен и объемом садки в туннельных печах, вследствие наличия зазоров между садкой и стенами туннеля, вес садки на единицу объема в туннельной печи на 5—10% меньше, чем в камерной печи.

Перед поступлением в печь каждой вагонетки габариты садки

контролируют габаритной рамой, установленной перед входной камерой зоны подогрева. Высота и ширина садки определяются размерами туннеля. Между садкой и стенами туннеля оставляют зазор в 50—100 мм. Если горение осуществляется в равнине между садкой двух соседних вагонеток, зазор в равнине составляет 300—500 мм. При этом вагонетки передвигают с таким расчетом, чтобы зазор приходился против вылетов из трюка, образуя как бы камеру сгорания газа. Само собой разумеется, что расположение топок в этом случае должно быть увязано с размерами вагонеток.

Характеристика работы. В туннельных печах расход тепла на обжиг меньше, чем в печах других типов, за исключением кольцевых с подвижным огнем. Ниже приведены данные по расходу тепла на обжиг, выраженные расходом условного топлива в % веса обожженных изделий:

двиг	20—25%	(1400—1750 кал/кг)
шамотные изделия	10—16%	(700—1120 ")
красный кирпич	4—6%	(280—420 ")
фарфор	16—30%	(1120—6300 ")
фаянс	30—37%	(2100—2590 ")

Примерный тепловой баланс туннельной печи для обжига технического фарфора приведен в табл. 42.

Таблица 42

Тепловой баланс туннельной печи для обжига технического фарфора

№ п/п	Наименование статей прихода	Количество тепла в %	№ п/п	Наименование статей расхода	Количество тепла в %
1	Потенциальное тепло топлива (мазута) . . .	87,90	1	Тепло, затрачиваемое на физико-химические процессы . . .	3,78
2	Теплота нагрева мазута и воздуха . . .	11,09	2	Теплота нагрева подвижного состава . . .	8,03
3	Теплота нагрева подвижного состава при поступлении в печь . . .	1,41	3	Теплота нагрева воздуха, отбираемого вентилятором на сушку . . .	22,64
			4	Теплота нагрева воздуха и газов, выбивающихся через неплотности печи . . .	21,75
			5	Теплота нагрева удаляемых из печи продуктов горения . . .	12,25
			6	Потери тепла кладкой печи и неучтенные потери	31,35
	Всего . . .	100,00		Всего . . .	100,00

4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЕЧИ

За последнее десятилетие с пламенными печами начинают успешно конкурировать электрические печи. По сравнению с пламенными электрические печи обладают рядом преимуществ, главнейшие из которых:

- 1) возможность точного контроля температурного режима и автоматического регулирования обжига по заранее намеченной кривой температуры;
 - 2) абсолютная чистота обжига;
 - 3) снижение количества брака;
 - 4) сокращение продолжительности обжига;
 - 5) экономия в расходах вспомогательных приспособлений (кассет, коробов и пр.);
 - 6) легкость обслуживания;
 - 7) улучшение санитарно-гигиенических условий труда и т. д.
- В настоящее время применяют как периодически действующие (камерные), так и непрерывно действующие (туннельные) электрические печи.

Камерные печи (рис. 173) имеют объем рабочего пространства до 2 м³. В качестве нагревательных элементов применяют глобальные или силитовые стержни. Температура обжига—до 1400°. Электрические печи оборудуют трансформаторами, при помощи которых можно изменять напряжение в сети в любых пределах и тем самым регулировать температуру в печи, а также компенсировать изменения электропроводности нагревателей с изменением температуры и увеличением срока их службы. В электрических печах можно обжигать любые керамические материалы, инертные к воздействию газовой среды или требующие окислительной атмосферы.

Если в процессе обжига необходима восстановительная атмосфера, как, например, при обжиге фарфоровых изделий, в рабочее пространство печи необходимо вводить восстановительные газы. В непрерывно действующих установках осуществляется

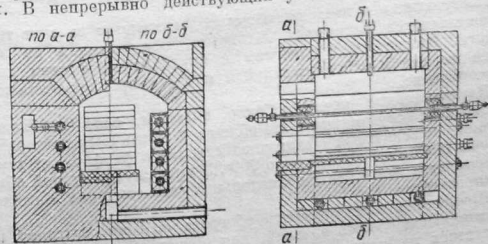


Рис. 173. Камерная электрическая печь.

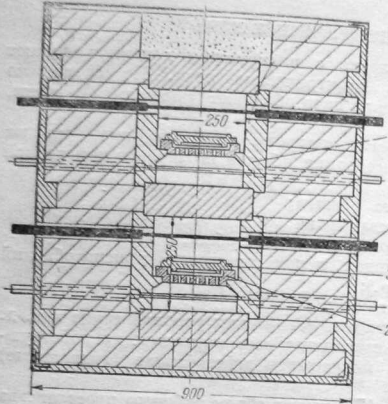


Рис. 174. Малогабаритная электрическая туннельная печь:

1—футеровка печи; 2—неподвижный фасонный камень; 3—поддон, проталкиваемый через печь; 4—нагреватель.

элементов сопротивления и лишь в незначительной степени путем конвекции от циркулирующих в печи газов, т. е. условия теплопередачи в них такие же, как и в муфельных печах. Поэтому с увеличением поперечного сечения печи значительно возрастает неравномерность температур по сечению, что и ограничивает возможность увеличения размеров печей.

Для лучшего использования тепла электрические туннельные печи обычно делают двухканальными со встречным движением вагонеток.

Поступающие в печь вагонетки подогреваются за счет тепла охлаждающихся встречных вагонеток, поступающих из зоны обжига. Расход электроэнергии в двухканальной печи почти такой же как и в одноканальной печи, а производительность вдвое больше.

Двухканальные печи особенно выгодны, если необходимо одновременно осуществлять два обжига до различных температур, например, бисквитный обжиг хозяйственного фарфора до температуры 1400° и глазурный — до 900°. В этом случае второй обжиг производится почти без дополнительной затраты тепла и расхода электроэнергии.

Применение электрического обогрева особенно выгодно при бескапельном обжиге изделий, для обжига которых в пламенных печах требуются капсулы (обжиг санфаянса). При приме-

автоматическая регулировка состава и количества подаваемых в печь газов.

Непрерывно действующие туннельные электрические печи могут быть небольших размеров (сечение рабочих каналов $\approx 0,01 - 0,03 \text{ м}^2$, мощность 20—30 квт) и больших (длина до 110 м, сечение рабочих каналов $0,75 \div \pm 0,8 \text{ м}^2$, мощность 500 \div 600 квт). Небольшая электрическая туннельная печь показана на рис. 174.

Тепло в электрических печах передается, главным образом, за счет лучеиспускания раскаленных

Таблица 43

Расход электроэнергии при обжиге различных изделий в двухканальной туннельной печи

Наименование материала	Температура обжига в град.	Продолжительность обжига и охлаждения в час.	Расход электроэнергии в кв/кг изделий
Фарфоровые изоляторы	1410	90—100	2,200—4,000
Хозяйственный фарфор	1000—900	54—56	брутто 1,000 нетто 4,900
Санфаянс:			
бисквитный обжиг	1280	34—50	1,600—1,800
глазурный обжиг	1100	33—36	1,300—1,600
Облицовочная плитка:			
бисквитный обжиг	1280	80—100	0,500—0,700
глазурный обжиг	1060	30—50	0,400—0,600
Шамотные изделия	1380		0,870
Декоративный обжиг	830—960		0,250—0,700

нени капсулы экономичность электрообжига снижается. Вопрос устойчивости и стоимости нагревательных элементов имеет большое значение. В среднем продолжительность службы составляет до 2 000 часов, т. е. смена производится четыре раза в год. Замена элементов является почти единственным расходом на ремонт, так как регуляторы температуры предупреждают пере-

тры. Расход электроэнергии при обжиге различных изделий в электрических туннельных печах приведен в табл. 43. Примерные тепловые балансы одноканальной и двухканальной электрических печей при бисквитном обжиге до 800° приведены в табл. 44.

Таблица 44

Тепловой баланс электрической туннельной печи для бисквитного обжига фарфора

Наименование статей расхода тепла	Печь одноканальная		Печь двухканальная	
	расход тепла на 1 кг изделий			
	квч	%	квч	%
Потери в окружающую среду:				
в зоне обжига	0,216	} 25,00	0,120	} 48,00
в зоне подогрева	0,455		0,372	
в зоне охлаждения глобировых нагревателей	0,144		0,150	
Потери на охлаждение глобировых нагревателей	0,492	15,03	0,372	25,00
Потери через под вагонеток	1,056	33,00	0,264	18,00
Нагрев капсул и изделий	0,864	27,00	0,186	9,03
Всего	3,228	100,00	1,464	100,00

5. ОСНОВЫ РАСЧЕТА ПЕЧЕЙ

Расчет печей для обжига сводится к решению следующих задач:

- 1) определению режима обжига,
- 2) определению размеров печи при заданной производительности,
- 3) определению расхода топлива и составлению теплового и материального балансов,
- 4) расчету размеров элементов печи (топок, горелок, газопроводов, воздухопроводов, дымовой трубы) и
- 5) подбору энергетического оборудования.

Режим обжига и охлаждения изделий определяют, исходя из эксплуатационных и теоретических данных, в зависимости от рода обжигаемых изделий, типа печи, ее размеров и других условий работы.

Исходя из принятого режима обжига, определяется объем рабочего пространства печи, необходимый для обеспечения заданной производительности, и устанавливаются основные размеры печи.

Объем рабочей камеры печи периодического действия определяют, исходя из производительности и плотности садки. Если:

$G_{год}$ — годовая производительность печи в т/год,
 Z — продолжительность работы печи в течение года в часах,
 Z_1 — продолжительность процессов подогрева, обжига, охлаждения, загрузки и выгрузки в часах,
 g — плотность садки в т/м³,
 то требуемая емкость печи:

$$V_n = \frac{G_{год} \cdot Z_1}{Z \cdot g} \text{ м}^3. \quad (1)$$

Кривую обжига делят на несколько участков, соответствующих определенным стадиям обжига, и определяют распределение температур в кладке, количество тепла, аккумулированного кладкой, и потерю тепла в окружающую среду.

Затрата тепла на испарение влаги, содержащейся в материале изделия, на их нагрев и на реакции, протекающие в них, подлинчивается с учетом данных, приведенных на стр. 307—308.

Потеря тепла с отходящими газами подсчитывается в предположении, что температура отходящих газов на 50—100° превышает температуру материала или изделий. Зная отдельные статьи расхода тепла, определяют расход топлива и далее — размеры топок, горелок, каналов и энергетических устройств. Тепловой баланс за весь период обжига определяется суммированием отдельных балансов.

Максимальный расход топлива приходится на последний период обжига при высоких температурах, и задачу определения максимального расхода топлива часто упрощают, составляя средний за весь период обжига тепловой баланс печи. По данным

среднего теплового баланса определяют средний расход топлива за весь период обжига. Максимальный расход топлива принимают на 50% выше среднего.

При расчете многокамерных печей кривая обжига делится на периоды, причем общее количество камер определяется как сумма камер, находящихся в различных стадиях обжига.

Если Z, Z', Z_1, Z_2, Z_3 и Z_4 — продолжительность соответственно — работы печи в течение года, полного цикла обжига, подогрева, обжига, охлаждения, выгрузки и загрузки и n, n_1, n_2, n_3 и n_4 — число камер соответственно общее, на подогреве, на обжиге, на охлаждении, выгрузке и загрузке, то общую полезную емкость печи V_n определяют, исходя из годовой производительности $G_{год}$ и плотности садки изделий g по формуле:

$$V_n = \frac{G_{год} \cdot Z'}{g \cdot Z}. \quad (2)$$

При емкости камеры V_k число камер n составляет:

$$n = \frac{V_n}{V_k}, \quad (3)$$

из них на подогреве находится $\frac{Z_1}{Z}n$, на обжиге $\frac{Z_2}{Z}n$, на охлаждении $\frac{Z_3}{Z}n$ и на выгрузке и загрузке $\frac{Z_4}{Z}n$ камер. Тепловой баланс для определения расхода топлива составляется или для камеры, находящейся на обжиге, или для всей печи в целом.

При отношении теплового баланса ко всей печи в целом не учитывается тепло, аккумулируемое кладкой, равно как и тепло, затрачиваемое на подогрев материалов или изделий.

Для уточнения расчетов по отдельным элементам печи составляют балансы зон подогрева обжига и охлаждения.

Для всех печей непрерывного действия по данным теплового баланса зоны охлаждения устанавливают количество тепла, возвращаемого из зоны охлаждения в зону обжига с воздухом для горения, и количество тепла, используемого на стороне подогрева и коэффициент полезного действия печи.

Кривую обжига проверяют, выясняя возможность отдачи от газов материалу или изделиям и восприятия воздухом соответственных количеств тепла.

При расчете кольцевых печей учитывают скорость огня W м/сутки.

Если
 $g_{мес}$ — выпуск кирпича в шт/месяц,
 g_m — производительность печи на 1 м³ канала в месяц шт/месяц м³,
 g — плотность садки в шт/м³,

$$g_m = \frac{g_{мес}}{V} = \frac{30Wg}{L} = 30 \frac{g}{L_{сутк}} \text{ шт/м}^3 \text{ в мес.} \quad (4)$$

$$W = \frac{24(L - n'l)}{Z_{\text{оч}} \cdot 30g} = \frac{g_m L}{30g} \text{ м/сутки}, \quad (5)$$

где: L — длина обжигательного канала в м,
 l — длина отдельной камеры в м,
 n' — число камер на загрузке, выгрузке и ремонте в течение одного цикла работы,
 $Z_{\text{сум}} и Z_{\text{оч}}$ — продолжительность полного цикла обжига в часах или сутках

$$Z_{\text{сум}} = \frac{L}{W} = \frac{30g}{g_m} = \frac{30}{m} \text{ суток}, \quad (6)$$

где m — оборачиваемость печи в месяц.

Из приведенных зависимостей следует, что оборачиваемость печи повышается с увеличением скорости огня и плотности садки или с уменьшением продолжительности обжига.

Тепловой баланс кольцевой печи составляется аналогично балансу многокамерных печей для одной камеры или для печи в целом.

Длина туннельной печи L определяется по формуле:

$$L = \frac{K}{k} \text{ м}, \quad (7)$$

где: K — количество материалов или изделий, которое должно поместиться в туннеле в кг,

k — количество изделий на 1 м туннеля в кг,

$$K = GZ \text{ кг} \quad (8)$$

где: G — производительность печи в кг/час,

Z — полная длительность обжига в час.

$$k = Fg \text{ кг/м} \quad (9)$$

где: F — сечение туннеля в м²,

g — плотность садки в кг/м³.

Средняя скорость вагонетки W определяется из выражения

$$W = \frac{G}{k} \text{ м/час}. \quad (10)$$

Если

l_1, l_2 — длина зон подогрева, обжига и охлаждения в м,

L — общая длина туннеля в м,

Z_1, Z_2, Z_3, Z — время пребывания изделий или материала в отдельных зонах и во всей печи в часах,

то

$$l_1 = \frac{LZ_1}{Z} \text{ м}, \quad (11)$$

$$l_2 = \frac{LZ_2}{Z} \text{ м}, \quad (12)$$

$$l_3 = \frac{LZ_3}{Z} \text{ м}. \quad (13)$$

Как и в других случаях, Z принимается по данным опыта или обосновывается теоретически.

Расход топлива определяется из теплового баланса зон обжига и подогрева. Тепловой баланс зоны охлаждения позволяет определить температуру и количество подогретого воздуха.

6. РАЦИОНАЛЬНЫЙ РЕЖИМ ОБЖИГА КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ*

Большое значение имеет определение максимально допустимых скоростей обжига и охлаждения керамических изделий. Нахождение соответствующих закономерностей, хотя бы для отдельных стадий обжига, должно позволить резко повысить производительность печей и качество обжига и дать возможность теоретически обосновать оптимальную кривую обжига и охлаждения изделий.

Допустимая скорость подъема и снижения температуры керамических изделий зависит от тепловых и физико-химических процессов, протекающих в материале, связанных с перекристаллизацией, образованием жидкой фазы и затвердеванием ее. В известных интервалах температур решающее значение для возможности максимального ускорения теплового процесса имеют термические напряжения.

Недостаточность опытных данных позволяет пока рекомендовать использование теоретических формул лишь в качестве первого приближения и в целях обработки опытных данных. Это позволит в конечном итоге перейти к теоретически обоснованным прогрессивным методам расчета. Метод определения рационального режима обжига керамических изделий разработан и соответствующие эксперименты проведены С. Н. Деликинским и одновременно И. М. Семеновом под руководством Н. Н. Доброхотова.

Механизм возникновения термических напряжений в теле обрабатываемых керамических изделий объясняется следующим образом. При нагреве изделия наружные слои его имеют более высокую, а внутренние слои более низкую температуру. Где-то в теле изделия можно представить себе такую изотермическую поверхность, все точки которой имеют температуру, равную средней температуре по всей массе изделия t_c .

Наружный объем тела при температуре t_c равен:

$$V_t = V_0 (1 + 3\alpha t_c),$$

где: V_0 — объем тела при температуре $t = 0^\circ$,
 α — линейный коэффициент температурного расширения материала,

t_c — средняя температура всего нагретого изделия.

* Составлено действительным членом Академии Наук УССР Н. Н. Доброхотовым.

Допустим, что t поверхности больше t центра. Если бы данное тело было равномерно нагрето до температуры t_c , то все точки изделия остались бы на прежнем месте и напряжений в изделии не было бы. Материал, находящийся между наружной и внутренней поверхностью с температурой t_n и нейтральной поверхностью с температурой t_c , обладает большей температурой, чем средняя температура, поэтому он стремится расшириться соответственно своей повышенной температуре и находится в сжатом состоянии, так как объем тела соответствует лишь средней температуре. Материал, находящийся между нейтральной поверхностью и центром изделия, обладает меньшей температурой, чем средняя температура тела, и находится в растянутом состоянии, так как объем тела больше того объема, который имело бы тело, нагретое до температуры центра.

Итак, при нагреве керамических изделий до наступления усадки наружные слои изделия находятся в сжатом состоянии, а внутренние слои находятся в растянутом состоянии. При усадке изделий напряжения меняют свой знак.

При одностороннем сжатии изделия в нем развиваются, кроме сжимающих напряжений, скалывающие (срезающие) напряжения; максимальная их величина получается в сечении, расположенном под углом 45° к направлению сжатия и равная половине величины напряжения сжатия. Поэтому, если сопротивление материала сдвигу меньше половины сопротивления на сжатие, то при некоторой предельной нагрузке в теле изделия возникает сдвиг, который может повести к разрушению изделия.

Возникшие при нагреве напряжения приводят к разрушению изделий, если они превосходят предел прочности материала изделия, или к остаточным деформациям, если они превосходят предел упругости материала.

В табл. 45 приводятся формулы для расчета максимальных термических напряжений в телах различной формы, известные из курсов сопротивления материалов.

Таблица 45

Формулы для расчета максимальных термических напряжений

Форма тела	Напряжение на поверхности		Напряжение в центре	
	формулы	№ формул	формулы	№ формул
Пластина Слоистой цилиндра	$\sigma_x = \sigma_z = \mp \frac{2}{3} \frac{\alpha E}{1-\mu} \Delta t_{\max}$	(14)	$\sigma_y = \sigma_z = \mp \frac{1}{3} \frac{\alpha E}{1-\mu} \Delta t_{\max}$	(17)
	$\sigma_x = \mp \frac{1}{2} \frac{\alpha E}{1-\mu} \Delta t_{\max}$	(15)	$\sigma_z = \mp \frac{1}{2} \frac{\alpha E}{1-\mu} \Delta t_{\max}$	(18)
Слоистой шар	$\sigma = + \frac{2}{5} \frac{\alpha E}{1-\mu} \Delta t_{\max}$	(16)	$\sigma = \mp \frac{2}{5} \frac{\alpha E}{1-\mu} \Delta t_{\max}$	(19)

В таблице верхние знаки относятся к случаю нагрева, а нижние — к случаю охлаждения или усадки, причем знак плюс означает растягивающие напряжения, а знак минус — сжимающие напряжения.

Δt_{\max} — максимальный температурный перепад между поверхностью и центром изделия при всестороннем равномерном нагреве;

α — коэффициент температурного расширения,

E — модуль упругости,

μ — коэффициент Пуассона.

Допустимой скоростью нагрева керамических изделий будет такая скорость, при которой возникшие в теле напряжения близки к пределу прочности материала изделия, но не превосходят его.

Для определения допустимой скорости нагрева С. Н. Деикшикин предложил следующую формулу:

$$\vartheta = \frac{c_{\text{доп}}(1-\mu) \cdot a}{\eta \cdot \alpha \cdot E \cdot s^2} \text{ град/час}, \quad (20)$$

где: ϑ — скорость изменения температуры в град/час;
 $c_{\text{доп}}$ — допустимое напряжение материала на разрыв в кг/см²;
 η — коэффициент формы;
 a — температуропроводность материала в м²/час;
 α — коэффициент линейного расширения материала;
 E — модуль упругости материала в кг/см²;
 s — определяющий размер изделия в м. Для равномерно нагреваемой с двух сторон пластины s равно половине толщины, для цилиндра и шара — радиусу, для полого цилиндра или полого шара — разности между наружным и внутренним радиусами.

При этом свойства керамических материалов могут быть оценены грубо ориентировочно следующими величинами. Коэффициент Пуассона для различных керамических материалов составляет примерно от 0,3 до 0,25. Величина временного сопротивления разрыву составляет для сухого необожженного материала 5—12 кг/см². Надежных данных о временном сопротивлении разрыву большинства керамических изделий не имеется. Величина модуля упругости для необожженного материала составляет примерно 40 000—70 000 кг/см² и для обожженного — 100 000—1 000 000 кг/см². Для таких материалов, как шпат и диас, величина E приближается к нижнему пределу, а для фарфора — к верхнему. Специальные сорта фарфора имеют модуль упругости до 1 700 000 кг/см², а модуль упругости литеркорунда достигает даже 2 300 000 кг/см². Коэффициент терморудна достигает даже $(2-20) \cdot 10^{-6}$ и изменяется для нейтральной поверхности составляет в процессе их тепловой обработки и тех же материалов в процессе кварца составляет ботки. Коэффициент линейного расширения дианса в интервале 0,5-10⁻⁴, а максимальный коэффициент расширения дианса в интервале температур 300—700° составляет 100-10⁻⁴. Температуропроводность материала может быть определена, если известны тепло-

емкость, теплопроводность и объемный вес его. Для шмота и фарфора температуропроводность лежит в пределах 0,001—0,002 м²/час.

Формула С. Н. Деликишкина применима для расчета допустимой скорости нагрева керамических изделий в период упругого состояния материала, т. е. для такого состояния, при котором к материалу применим закон Гука.

В зависимости от состава глины, в материале керамического изделия при температурах 650—700° появляется жидкая фаза, и материал перестает подчиняться закону Гука. Кроме этого, в связи с тем, что в материале керамического изделия происходит целый ряд физико-химических превращений, физические свойства материала (σ , α , E , μ) будут различны при различных температурах. Определение физических свойств керамических материалов при различных высоких температурах связано с большим рядом трудностей, и значения их мало известны.

И. М. Семенюк предлагает метод установления оптимального режима обжига керамических изделий, исходя из максимально допустимой разницы температур в теле изделия при его нагреве или охлаждении.

Из табл. 39 видно, что если существует допустимый предел прочности изделия, то существует и максимально допустимое значение температурного перепада в теле изделия. Так как керамические изделия сопротивляются разрыву значительно хуже, чем сжатию и сдвигу, то значение допустимого температурного перепада, возникающего в изделии при нагреве или охлаждении, необходимо определять из тех формул, в которых учитываются напряжения разрыва.

Так, для пластин допустимую разность температур по сечению тела при нагреве в период расширения материала определяют по формуле:

$$\sigma = \frac{1}{3} \frac{\alpha \cdot E}{1 - \mu} \Delta t_{\max}, \quad (17)$$

откуда

$$\Delta t_{\text{доп}} = \frac{\sigma_{\text{доп}} \cdot 3(1 - \mu)}{\alpha \cdot E}. \quad (24)$$

В период усадки материала (и в период охлаждения) допустимая разность температур определяется по формуле:

$$\Delta t_{\text{доп}} = \frac{\sigma_{\text{доп}} \cdot 3(1 - \mu)}{2 \cdot \alpha \cdot E}. \quad (22)$$

Важно отметить, что величина допустимого температурного перепада зависит от физических свойств материала (прочности, коэффициента расширения, модуля упругости, коэффициента Пуассона) и не зависит от размеров тела. Таким образом величину допустимого температурного перепада в теле изделия можно характеризовать чувствительность материала к нагреву. Для

периода упругого состояния материала величину допустимого температурного перепада можно определить расчетным путем по формулам (21) и (22), если известны физические свойства материала изделия. И. М. Семенюк предлагает определять величину допустимого температурного перепада экспериментальным путем по следующей методике.

Сначала изделия, предназначенные для обжига (с влажностью около 5%) сажают в печь, нагретую до разных температур и определяют при какой минимальной температуре печи в загружаемых изделиях начинают образовываться трещины. Затем в образец изделия заправляют термометры, одну в центре, другую на поверхности. Спай и провода располагают по изотермическим поверхностям в целях более точного измерения температуры материала.

После этого образец с заправленными в него термометрами загружают в печь с температурой на 40—50° ниже той температуры, при которой на нагреваемых образцах получаются трещины. После 20-минутной выдержки выгружают образец и убеждаются, что на нем нет трещин. По графику записей температуры поверхности и центра образца определяется максимальная разность температур между поверхностью и центром изделия. Это значение будет допустимым температурным перепадом для данного материала. Для изделий из киевской спондиловой глины (70%) и лёсса (30%) в начальный период обжига величина допустимой температурной разницы получается равной 100°.

Если для данного материала известна величина допустимого температурного перепада, то можно определить для различных керамических изделий: а) допустимую температуру печи, безопасную для качества изделий при загрузке и выгрузке; б) допустимую скорость нагрева.

По предложению И. М. Семенюка допустимую скорость нагрева керамических изделий можно определить по формуле:

$$\theta_{\text{доп}} = \frac{\Delta t_{\text{доп}} \cdot a}{k \cdot s^2} \text{ град./час}, \quad (23)$$

где: a —температуропроводность, равная 0,002 м²/час;
 s —толщина прогрета изделия в метрах. При двустороннем симметричном нагреве s равно половине толщины пластины, радиусу цилиндра или шара; при двустороннем асимметричном нагреве s равняется 0,75 толщины пластины, а при одностороннем нагреве s равняется половине пластины.

k —коэффициент, зависящий от формы тела, равен для бесконечной пластины 0,5, для куба—0,2, для шара—0,167, для цилиндра—0,2—0,25.

Максимальное значение коэффициента k равно 0,5. Если в формулу (23) подставить значение a и k , а s выразить в сан-

тиметрах, то допустимую скорость нагрева пластины можно определять по формуле:

$$\theta_{\text{доп}} = \frac{40 \cdot \Delta t_{\text{доп}}}{s^2} \text{ град/час.} \quad (24)$$

В процессе нагрева в материале керамических изделий происходит целый ряд сложных физических и физико-химических процессов, вызывающих изменение свойств материала. Сущность этих процессов зависит от минералогического и химического состава применяемого сырья. До температуры 110° происходит удаление остатков гигроскопической влаги. Начиная с температуры 350° , происходит удаление конституционной воды, входящей в состав глинистого вещества и других минералов. Отдача главной массы конституционной воды идет в интервале $430-500^\circ$. Нагрев изделий в период удаления конституционной воды замедлять нет необходимости, так как в этот период материал изделия обладает наибольшей пористостью, способствующей беспрепятственному удалению воды. При температуре 573° происходит перерождение β -кварца в α -кварц, связанное с увеличением объема на 2,4%. Этот процесс идет мгновенно и исследователям не удавалось получить β -кварц в перегретом состоянии. Согласно опытам, в период перерождения кварца не следует замедлять скорость нагрева керамических изделий.

В процессе нагрева в материале керамических изделий происходит реакции в твердых фазах. По данным П. П. Будникова и А. С. Бережного, температура начала этих реакций зависит от природы материала. Скорость этих реакций в твердом состоянии увеличивается с повышением температуры. При температуре $650-800^\circ$ в зависимости от состава глины начинается расплавление различных легкоплавких примесей и образование жидкой эвтектики. Жидкая фаза заполняет поры и стягивает частицы основного материала, вызывая огневую усадку. Для исследованных И. М. Семенюком материалов величина допустимого температурного перепада в период огневой усадки в интервале температур от 700 до 1000° равна 80° .

Конечная температура обжига керамических изделий выбирается в зависимости от рода сырья и назначения изделий с целью обеспечения надлежащих свойств готовой продукции. При интенсивном нагреве конечная температура обжига изделий несколько повышается. Для выравнивания температуры по всей толщине обжигаемого изделия, ликвидации остаточных напряжений и для обеспечения прохождения необходимых реакций изделия выдерживают при конечной температуре обжига. Время выдержки изделий при постоянной температуре поверхности следует определять по формуле:

$$\tau = m \cdot \frac{s^2}{a} \text{ часов,} \quad (25)$$

где m —коэффициент, зависящий от желательной степени выравнивания температуры в теле изделия. Исследования показали, что керамические изделия следует выдерживать при конечной температуре обжига до выравнивания температуры на $90-95\%$. При этом время выравнивания температуры (в часах) можно определить по формуле:

$$\tau = 700 \cdot s^2 \text{ часов.} \quad (26)$$

Если этого времени недостаточно для прохождения необходимых реакций, то следует несколько повысить температуру обжига. Необходимо следить, чтобы при повышении температуры обжига не происходило вспучивание материала и не образовывалась пыздреватость, вызываемые выделением образующихся газов и паров. Начало охлаждения керамических изделий является ответственным периодом обжига. Скорость охлаждения изделий в начальный период определяется тремя факторами: а) скоростью зарождения кристаллов, б) скоростью роста кристаллов, в) прочностью материала. По опытным данным, охлаждать изделия из легкоплавких глин на первые $100-150^\circ$ следует так, чтобы величина температурного перепада в изделии равнялась $30-35^\circ$.

После того, как изделие охладится на первые $100-150^\circ$, дальнейший процесс охлаждения можно значительно интенсифицировать. Для исследования И. М. Семенюком сырья допустимая величина температурного перепада между поверхностью и центром изделия получалась равной $120-125^\circ$. При охлаждении изделий, содержащих значительное количество кварца, как, например, динаса, необходимо следить, чтобы не происходило растрескивание во время изменения модификации кварца. Так, при температуре $250-200^\circ$ возможно образование трещин в связи с превращением β -кристаболита в α -кристаболит, вызывающим увеличение объема на 5,6%.

КОНТРОЛЬ И РЕГУЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПЕЧЕЙ И СУШИЛОК

Теплотехнический контроль работы печи производится в целях установления определенного технологического режима, обеспечивающего получение продукции требуемого качества в нужном количестве и оптимальную экономичность процесса, а также в целях расчетного контроля протекающих процессов.

Теплотехническому контролю подвергаются как рабочую камеру, так и вспомогательные части печей и сушилок.

Контроль работы печей ведется при помощи непосредственного наблюдения (глазом и с помощью инструмента), наблюдения показаний контрольно-измерительной аппаратуры, установления расчетной зависимости между составами и количествами топлива и продуктов горения (расчетный контроль) и при помощи автоматических регулирующих приборов.

Обычно все виды контроля дополняют друг друга.

1. НЕПОСРЕДСТВЕННОЕ НАБЛЮДЕНИЕ

Непосредственное наблюдение накала кладки и вида пламени или продуктов горения позволяет судить о температурах, характере пламени и степени завершения реакций горения в печи.

Пламя топлива, содержащих углеводороды при наличии несгоревших составных частиц непрозрачно и ярко светится вследствие присутствия частичек углерода. Прозрачное пламя до известной степени является признаком полного сгорания. Горение в дымоходах указывает на приток воздуха через неплотности кладки и высокую температуру продуктов горения, содержащих горючие составные части. Внешний вид продуктов горения в участках с низкими температурами и при выходе в атмосферу может дать представление о примеси сажистого углерода и горючих газов, частично разлагающихся с выделением сажи. При значительной неполноте горения и присутствии сажистого углерода или смол из дымовой трубы выделяются окрашенные в черный или бурый цвет газы.

Количественная характеристика неполноты горения путем непосредственного наблюдения затруднительна. При отсутствии или низком содержании в горючем газе углеводородов затруднительна и качественная характеристика.

Непосредственным наблюдением можно определить и харак-

тер давления в печных полостях. Поднеся к печи зажженную лучину или бумагу, можно по направлению пламени определить, происходит ли выбивание газов (положительное давление) или всасывание воздуха (разрежение). В участках с более низкой температурой это возможно определить и рукой.

Давление в пламенном пространстве может быть определено и по ореолу пламени у отверстий, образуемому на уровне положительного давления вследствие втягивания горящих газов. Ниже ореола пламени давление отрицательное, и снаружи присасывается воздух.

Для оценки температуры и состояния отдельных зон в газогенераторе в слой топлива на короткое время погружают металлический лом и затем измеряют длину различно накалившихся частей его и оценивают их накал.

О качестве генераторного газа и состоянии газогенератора судят по цвету газа и характеру пламени газа, а также наблюдая состояние поверхности слоя топлива.

При сухих топливах поверхность слоя имеет красную окраску, и на ней равномерно распределены куски свежазгоревшего топлива. При общем прогаре поверхность приобретает равномерную светлокрасную окраску. При местном прогаре образующаяся непрозрачная пламя препятствует наблюдению за состоянием слоя.

При большом содержании летучих газ имеет буровато-желтый цвет; при очень малом — он прозрачен и имеет голубоватый оттенок. При прогаре температура газа повышается, и сажа, выделяющаяся в результате разложения смол, придает газу темную окраску; газ часто загорается при выходе из отверстия. При большом содержании влаги газ имеет беловатый цвет.

Хороший газ горит желтым пламенем. Пламя газа при малом содержании углеводородов более прозрачно и имеет золотистый оттенок. Газ, содержащий много горючих, горит красноватым пламенем, и содержащий много сажи — темным пламенем с искрами.

2. АППАРАТУРНЫЙ КОНТРОЛЬ

Аппаратурному контролю подвергаются температура, давление, состав и количество газов, состав, количество и теплотворную способность топлива, температуру, уровень и движение исходных материалов и продуктов в печах и сушилках. Помимо этого устанавливаются показатели, характеризующие работу отдельных аппаратов или оборудования, обслуживающих печи и сушилки: расход и температура воздуха и воды на охлаждение, давление в воздухопроводах, расход энергии на привод вентиляторов и т. д.

Применение аппаратного контроля не устраняет необходимости непосредственного наблюдения и дает наилучший эффект в сочетании с ним, позволяя быстро замечать изменения режима, устанавливать его и избегать неполадок.

Управление работой установки, оценка и регулирование работы печей и вспомогательного оборудования, выявление и ликвидация отклонений от заданного режима, выявление и ликвидация базы для финансовых расчетов с цехами — потребителями и поставщиками — в основном базируются на показаниях контрольно-измерительной аппаратуры.

Различают непрерывный, периодический и специальный контроль.

При непрерывном контроле непрерывно, с помощью автоматической стационарной аппаратуры, регистрируют технические наиболее важные показатели работы печи или показатели, требующиеся для расчета с другими цехами.

В случае отсутствия регистрирующих приборов непрерывный контроль заменяется частым и систематическим периодическим контролем с помощью стационарной аппаратуры, снабженной указателем. Запись показаний производится обслуживающим персоналом через определенные промежутки времени.

Специальный контроль устанавливается при производстве испытаний в целях подробного выявления работы печи в целом или отдельных ее частей или вспомогательного оборудования.

С аппаратурным контролем связан расчетный контроль, материал для которого дает аппаратурный контроль.

Контроль температур

Контроль температур имеет огромное значение для газогенераторов, печей и сушилок. Температуры в печной системе являются показателем, характеризующим работу ее частей, и позволяющим установить происходящие изменения режима и их причины.

Измерение температур паровоздушной смеси, подаваемой в газогенератор, и температуры генераторного газа на выходе позволяет контролировать режим и ход газогенератора.

Поддержание определенной температуры у смолоотделительных приспособлений дает возможность избежать конденсации влаги газа в них, а за scrubберами — обеспечивает контроль выделения влаги из газа, то есть его осушки.

Измерение температур в рабочей камере всех печей и сушилок позволяет поддерживать определенный температурный режим, а следовательно, и технологический режим, что обеспечивает требуемые производительность, качество продукции, а для печей — и стойкость кладки. Оно позволяет также определить температуру поступающих в печь материалов, топлива, воздуха и отводящих из печи продукта и отходящих газов.

При наличии устройств для возбуждения циркуляции газов и для отбора нагретого воздуха на сторону, как, например, в туннельных печах, измерение температур дает возможность также регулировать работу этих устройств. У кольцевых печей измерение температур позволяет регулировать подогрев воздуха и охлаждение отходящих газов.

Измерение температур в теплообменных устройствах для нагрева воздуха, газа и материалов позволяет установить степень использования тепла отходящих газов, а также характеристику работы этих частей печи.

Измерение температур по пути газов в газопроводах позволяет установить качественную характеристику потерь тепла в окружающую среду и места присоса воздуха, а также разрежение, создаваемое дымовой трубой.

Результаты измерения температур газов в каналах, материалах и продукта используют для составления теплового баланса печи в целом или отдельных ее частей.

Приборы, служащие для замера температур, подразделяются на три группы: термометры* расширения, пирометры, размягчающиеся и плавящиеся при нагреве, и пирометры, действие которых основывается на изменении с температурой электрических и тепловых свойств тела-измерителя.

Ртутные термометры просты в обращении, позволяют легко производить отсчеты и дешевы. Недостатком их является невозможность или затруднительность регистрации показаний.

Манометрические термометры можно применять при тяжелых условиях работы, отсутствии квалифицированного персонала и в случае необходимости, некоторого отдаления измерительного прибора от места измерения.

Преимуществами термометров сопротивления являются возможность автоматической регистрации температур вдали от места измерений и значительная точность измерений при низких температурах. Недостаток этих термометров — необходимость в источнике тока.

Для измерения температур до 1400° часто применяют термоэлектрические пирометры, показания которых можно регистрировать на расстоянии. При измерении более высоких температур термоэлектрические пирометры заменяют пирометрами других типов в основном оптическими.

Различают оптические пирометры, измеряющие часть излучения в пределах определенных длин волн, — пирометры частичного излучения, или монохроматические, — и измеряющие общее излучение, или пирометры полного излучения, или радиационные.

Пирометр частичного излучения служит для периодических замеров. Показания его нельзя регистрировать, и они являются субъективными. Для пользования этим пирометром необходим источник тока. Пирометр требует минимальной поверхности накала, допускает точные измерения.

При радиационных пирометрах возможна автоматическая регистрация показаний, что является их преимуществом по сравнению с монохроматическими пирометрами. Они не требуют

* Подразделение на термометры и пирометры нечеткое. Обычно приборы для измерения температур до 500° называют термометрами, а для более высоких температур — пирометрами.

напряжения тока. Этим объясняется их широкое распространение.

Радиационный пирометр быстро реагирует на изменение температуры печи в противоположность термоэлектрическим пирометрам, имеющим защитную арматуру (фарфоровые или кварцевые газонепроницаемые трубки) с большой теплоемкостью. Кроме того, на арматуру термомпар и самые термомпары неблагоприятно влияют высокая температура, печные газы и пыль.

При установке радиационных пирометров следует предусматривать охлаждение корпуса и подачу воздуха под давлением во избежание попадания печных газов внутрь пирометра (рис. 175).

В керамической промышленности имеют большое распространение пирокоспы. Хотя они не дают представления о скорости подъема и о понижении температуры, но в силу простоты, дешевизны, надежности, а главное достаточной характеристики достигаемых температур, являются важным контрольным элементом при обжиге керамических изделий.

Для измерения температур до 300° применяют ртутные термометры, термометры сопротивления и термоэлектрические пирометры. В области $400-1000^{\circ}$ преимущественно используют термоэлектрические пирометры, а для измерения более высоких температур—также оптические. В интервале температур $100-800^{\circ}$ применяют железо-копелевые термомпары и в интервале $700-1000^{\circ}$ хромель-алюмелевые. При температурах $700-1400^{\circ}$ и выше используют платина-платинородиевые термомпары.

Для измерения температур поверхностей пользуются термомпарами с обнаженным плоским спаем. Температуру в туннельных печах измеряют стационарно расположенными пирометрами и термомпарами, закрепленными в вагонетках или материале. По мере продвижения горячего спая термомпара сдвигается с барабана. Измерение температур стекломассы производят погруженными в нее термомпарами, которые часто снабжены водяным охлаждением. Температуру стекломассы в стадии формирования определяют путем впаивания в нее термомпары.

Измеряемая пирометрами температура является истинной температурой газов, кладки или материала. Термомпара или термометр участвуют в теплообмене. Они воспринимают тепло от более нагретых тел, например, от газов, и отдают его кладке, обмениваясь с ней лучеиспусканием. Отклонение температуры, измеряемой термомпарой, от температуры газов, кладки и материалов может быть очень значительным. Особенно оно велико в полостях регенеративных печей.

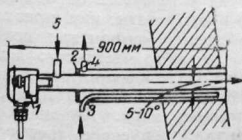


Рис. 175. Схема установки ардометра у стенки печи:

1 — ардометр, 2 — охлаждающая коiled трубка, 3 — подвод охлаждающей воды, 4 — отвод охлаждающей воды, 5 — подвод сжатого воздуха.

Чтобы устранить влияние инерции защитных оболочек термомпар и отдачи тепла излучением от кладки термомпары или наоборот, применяют термомпары, через которые просасываются с большой скоростью газы с помощью водоструйного насоса или эжектора, что возможно при достаточной устойчивости материала термомпар по отношению к газам.

При измерениях температур оптическим пирометром следует учитывать, что их градуируют по показаниям абсолютно черного тела, и следовательно, они указывают заниженную температуру тел, чернотность которых меньше единицы. При визировании оптическим пирометром кладки или материала на показание пирометров влияет излучение газов, заполняющих печь. Следует также учитывать, что оптические пирометры измеряют не только собственное, но и отраженное излучение. Особенно большие ошибки возникают при измерении температуры нечерных тел, находящихся вне печи.

Из сказанного следует, что температуры, измеряемые в печи, являются приближенными параметрами и при измерениях более точны их разности.

Температура печи не является определенным понятием, а представляет собой температуру, указываемую пирометром данного типа в определенных условиях.

Все указанные обстоятельства следует учитывать при установке пирометров и измерениях, обращая внимание на условия измерения.

Контроль давлений

Контроль давлений позволяет установить требуемый режим давлений, влияющий на распределение температур и характер газовой атмосферы, определить сопротивление отдельных участков, величину остаточного, суммарного и отдельных напоров и количество протекающих газов.

Измерение давления часто не дает непосредственного указания на характер технологического процесса, однако позволяет обнаружить отклонение режима от нормального.

Давление дутья в газогенераторе характеризует сопротивление слоя топлива и производительность газогенератора.

Давление в рабочей камере печи и сушилке характеризует приток воздуха или выбивание газов и влияет на температурный и газовый режимы. Увеличив разрежение в печи, можно вследствие притока воздуха создать окислительную атмосферу или же мешки холодных газов.

Увеличив давление, можно вызвать заполнение пламенными газами рабочей камеры и повысить температуру*.

* Давление в рабочей камере часто не измеряют. Однако замер его целесообразен и наилучшим образом может быть проведен у свода, где давление больше. При измерении необходима компенсация напора газов в трубке, соединяющей место измерения с манометром.

Контроль давлений в горелках, у основания регенераторов и рекуператоров, в газоходах и дымоходах дает представление о напоре и сопротивлении в этих участках и о возможности формирования. Изменение давления указывает на изменение сопротивления и необходимость принятия мер для ликвидации его (завала, загромождения).

Измерение давления у основания дымовой трубы позволяет судить о напоре, обеспечиваемом дымовой трубой, а в сочетании с давлением до трубного шибера — о запасе напора, не используемого печью. Прикрыв на короткий промежуток времени трубный шибер, можно определить полное разрежение (напор), создаваемое дымовой трубой, а следовательно, и сопротивление самой дымовой трубы.

Измерение давлений дает возможность определить количество протекающих газов. Большинство приборов, применяемых для измерения количества газа, основано на этом измерении.

Простейшими приборами для измерения давления до 500 мм вод. ст. являются U-образные манометрические трубки. При применении наклонных трубок точность отсчета увеличивается. Мембранные, поплавковые и колокольные манометры (тигомеры), а также кольцевые весы позволяют регистрировать показания.

Контроль состава газов

Обычно контролируют состав газообразного топлива и продуктов горения.

Контроль состава горючего газа позволяет установить качество его и пригодность для технических нужд и нужд отопления (содержание вредных примесей, теплоотвратную способность, возможную излучательную способность и т. д.). Он также дает возможность оценить работу газогенераторов и присос воздуха в каналах и камерах.

Контроль состава отходящих газов позволяет установить степень полноты горения топлива, выход продуктов горения, присос воздуха, величину избытка воздуха, характер газовой атмосферы и потери тепла с отходящими газами.

Определение состава газа за рабочей камерой дает представление о полноте сгорания газов. Даже определение только CO_2 характеризует процесс. Определение CO_2 и O_2 часто дает возможность расчетным путем определить содержание CO .

Исследование состава газов в каналах за рабочей камерой, у основания регенераторов и рекуператоров, до и после шиберов и в различных частях газопроводов позволяет обнаружить присос воздуха в отдельных участках, степень догорания горючих газов, присос горючего газа.

Пробы в различных участках забирают периодически. В местах с высокой температурой необходимо для забора проб применять плотные охлаждаемые водой трубки или трубки из материала, не взаимодействующего с газами и не влияющего каталитически.

В отдельных участках дымоходов, желательно в таких, где нет слишком большого присоса воздуха, часто устанавливают автоматический газоанализатор на CO_2 , или CO_2 и $\text{CO} + \text{H}_2$. Газоанализатор указывает и регистрирует не только результат горения топлива в рабочей камере печи, но и догорание газов и присос воздуха в остальной системе. Поэтому нежелательна установка автоматических газоанализаторов за неплотными клапанами и шиберами.

Для работы сушилок имеет большое значение контроль влажности теплоносителя, характеризующего режим сушки. Влажность отработанных газов характеризует степень их использования в процессе сушки. Влажность газов контролируют с помощью психрометров. Желательно применение электрических психрометров, допускающих передачу показаний на расстояние, регистрацию их, а также автоматическое регулирование влажности.

Полный или частичный анализ горючего газа с помощью автоматических газоанализаторов обычно делают у места производства газа и, кроме того, у места ввода газа в цех или завод.

В состав продуктов горения часто входят газообразные и парообразные продукты разложения и подсушки материалов (CO_2 , SO_2 и H_2O).

Обычно при анализе продуктов горения ограничиваются определением содержания CO_2 , O_2 , CO и N_2 . Если в продуктах горения содержится H_2 и углеводороды, используются аппараты для анализа горючего газа. Влажность продуктов горения обычно определяется расчетом по составу сухих газов или специальными исследованиями.

Анализ генераторного газа обычно заключается в определении содержания CO_2 , H_2S , тяжелых углеводородов (C_mH_n), O_2 , CO , CH_4 , H_2 и влаги. Так как одновременно с CO_2 поглощается и H_2S , определение содержания H_2S производится самостоятельно. Содержание H_2 и CH_4 определяется методом сжигания с последующим определением величин сокращения объема и анализом получающихся продуктов. Содержание CO также может быть определено методом сжигания. Содержание влаги определяется отдельно.

Состав газа контролируют ручными и автоматическими газоанализаторами. Желательно применять газоанализаторы, допускающие передачу показаний на расстояние и регистрацию их.

Для периодического анализа продуктов горения часто используют ручные газоанализаторы типа «Орса» с простыми сосудами или специальными, обеспечивающими быстрое поглощение.

Контроль количества газов

Измерение количества горючих газов позволяет определить расход их и выход при газификации. Кроме того, измерение количества газов дает возможность уточнить и проверить расчетные

данные по выходу продуктов горения. Измерение количества воздуха позволяет определить расход его для нужд горения, газификации и охлаждения.

Обычно измеряют количество воздуха, расходуемого на горение и количество горючего газа и воздуха, расходуемого на охлаждение. Легко измерить количества очищенного газа.

Количество дымовых газов обычно не замеряется, ввиду их высокой температуры и движения по кирпичным каналам, в которых затруднительна установка измерительной аппаратуры.

Количество газов определяют, измеряя скорость и сечение потока. Для этой цели служат приборы, измеряющие скорость в отдельных точках сечения (анемометры, пневмометрические трубки) и приборы, измеряющие все количество протекающего газа (дроссельные приборы).

Из дроссельных приборов преимущественно применяют диафрагмы как более простые и дешевые и наиболее изученные. Трубы Вентури дороги и громоздки. Засорение смолой меньше отражается на диафрагмах, чем на других дроссельных приборах. Разъедание сильно отражается на диафрагмах вследствие разрушения кромок. При установке диафрагмы вследствие неполного восстановления давления из-за образования вихрей имеет место значительная потеря давления. В трубе Вентури благодаря наличию специального диффузора образование вихрей и потеря давления наименьшие. В диафрагмах и соплах потеря давления составляет от 60 до 90% измеряемого перепада давления, а в трубах Вентури—15—20%. Перепад давления для газов составляет примерно 10—200 мм вод. ст.

Для получения правильных показаний приборов, измеряющих скорость и расход газа, требуется прямой участок газопровода достаточной длины и с неизменным сечением.

Контроль топлива

Топливо контролируют для определения величины его расхода, величину потерь и к. п. д. тепловых установок (составление теплового баланса), а также для установления свойств и степени пригодности топлива для технологических и энергетических нужд. Исследование генераторного газа дает, кроме того, представление о работе газогенератора.

Контролируют количество, состав и теплотворную способность топлива. Некоторое значение может иметь температура топлива. Наряду с твердым топливом контролируют очажные остатки, характеристика которых позволяет судить о полноте и качестве горения и газификации.

3. РАСЧЕТНЫЙ КОНТРОЛЬ

Между составом топлива и продуктов его горения или газификации, а также между составом сырых материалов и продук-

тов их обработки имеется количественная зависимость. Зная состав топлива и сырых материалов, можно определить выход и влажность отходящих газов, расход воздуха на горение, составить материальный и тепловой балансы печи или отдельных ее частей и определить к. п. д.

Определение указанных показателей называется расчетным контролем. Расчетный контроль дает возможность углубленно анализировать работу печи и ее отдельных частей.

Содержание в газах отдельных элементов

Для расчетного контроля необходимо знать содержание отдельных элементов в различных газах.

Его можно подсчитать, зная, что кг моль любого газа занимает объем в 22,4 м³. Следовательно, в 1 м³ CO₂ содержится $\frac{12}{22,4} = 0,536$ кг С и $\frac{2}{22,4} = 1,429$ кг О.

Если уточнить значение молекулярных весов и учесть опытные данные, получим следующие весовые содержания отдельных элементов в 1 м³ различных газов:

в 1 м ³ CO ₂ , CO, CH ₄	содержится	0,536 кг С,
в 1 м ³ C ₂ H ₄	»	2 · 0,536 кг С,
в 1 м ³ O ₂ , CO ₂ , SO ₂	»	1,429 кг О,
в 1 м ³ CO, H ₂ O	»	0,5 · 1,429 кг О,
в 1 м ³ H ₂ , H ₂ S, H ₂ O	»	0,0898 кг Н,
в 1 м ³ CH ₄ , C ₂ H ₄	»	2 · 0,0898 кг Н,
в 1 м ³ H ₂ S, SO ₂	»	1,429 кг С
в 1 м ³ N ₂	»	1,251 кг N

Определение выхода сухих газов, их влажности и расхода воздуха

Приводимые ниже формулы по сути одинаковы в случаях газификации и горения твердого и жидкого топлива, но обычно значительно упрощаются для случая горения вследствие более простого состава дымовых газов и отсутствия или, вернее, ничтожного содержания в них смолистых веществ и пыли, которые в значительном количестве содержатся в генераторном газе.

Введем следующие обозначения:
С^m, Н^m, О^m, N^m, S^m, А^m, W^m—содержания соответственно углерода, водорода, кислорода, азота, серы*, золы и влаги в кг/кг топлива.

С^g, S^g, W^g—количества соответственно углерода, серы и влаги, переходящие из обрабатываемых материалов в продукты горения в кг/кг топлива.

* Подразумевается сера, переходящая в газ, т. е. сера топлива за вычетом серы шлака, смолистых веществ и пыли.

C_m^a, S_m^a, W_m^a количества соответственно углерода, серы и влаги — переходящие из обрабатываемых материалов в продукты горения в $\text{кг}/\text{м}^3$ сухого газа.

$\text{CO}_2^a, \text{SO}_2^a, \text{O}_2^a, \text{CO}^a, \text{H}_2, \text{H}_2\text{S}^a, \text{CH}_4^a, \text{C}_2\text{H}_4^a, \text{N}_2^a$ — содержание соответственно углекислоты, сернистого газа, кислорода, окиси углерода, водорода, сероводорода, метана, этилена и азота (при индексе «а») в генераторном газе и при индексе «д» в продуктах горения) в $\text{м}^3/\text{м}^3$ сухого газа.

C_{cm}, C_{cm}^a, C_n — содержание углерода соответственно в смолистых веществах, шлаке и пыли (механическом недожоге) в $\text{кг}/\text{кг}$ топлива.

H_{cm} — содержание водорода в смолистых веществах и пыли в $\text{кг}/\text{кг}$ топлива.

C_m^a, C_n^a — содержание углерода соответственно в смолистых веществах и пыли в $\text{кг}/\text{м}^3$ сухого газа.

H_{cm}^a — количество водорода в смолистых веществах и пыли в $\text{кг}/\text{м}^3$ сухого газа.

V_{ca}, V_{ca}^a — выход соответственно сухого и влажного генераторного газа в $\text{м}^3/\text{кг}$ топлива.

V_{ca}^d, V_{ca}^d — то же для дымовых газов в $\text{м}^3/\text{кг}$ твердого или жидкого или в $\text{м}^3/\text{м}^3$ газообразного топлива.

V_a, V_a^a — расход воздуха соответственно для газификации или горения в $\text{м}^3/\text{кг}$ твердого или жидкого топлива.

W_n — расход пара на дутье или распыление в $\text{кг}/\text{кг}$ топлива.

$\text{H}_2\text{O}^a, \text{H}_2\text{O}^d$ — содержание влаги соответственно в генераторном газе или в продуктах горения в $\text{кг}/\text{м}^3$ сухого газа.

Горение и газификация твердого и горение жидкого топлива.

Определение выхода сухих газов. Выход сухих газов обычно определяется по балансу углерода.

На C^m углерода, содержащегося в 1 кг топлива, в генераторный газ переходит:

$$C^m - (C_{cm} + C_{cm}^a + C_n) \text{ кг}$$

или

$$C^m - C_{cm} - (C_{cm}^a + C_n^a) V_{ca} \text{ кг.}$$

В 1 м^3 сухого генераторного газа содержится $0,536 (\text{CO}_2^a + \text{CO}^a + \text{CH}_4^a + 2\text{C}_2\text{H}_4^a)$ кг углерода.

Если выход сухого газа V_{ca}^a , то должно существовать равенство:

$$0,536 (\text{CO}_2^a + \text{CO}^a + \text{CH}_4^a + 2\text{C}_2\text{H}_4^a) V_{ca}^a = C^m - (C_{cm} + C_{cm}^a + C_n), \quad (1)$$

откуда выход сухого газа:

$$V_{ca}^a = \frac{C^m - (C_{cm} + C_{cm}^a + C_n)}{0,536 (\text{CO}_2^a + \text{CO}^a + \text{CH}_4^a + 2\text{C}_2\text{H}_4^a)} \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (2)$$

Указанное выражение может быть представлено в ином виде:

$$V_{ca}^a = \frac{C^m - C_{cm}}{0,536 (\text{CO}_2^a + \text{CO}^a + \text{CH}_4^a + 2\text{C}_2\text{H}_4^a + C_{cm}^a + C_n^a)} \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (3)$$

При сжигании топлива в продуктах горения обычно не содержится $\text{CH}_4, \text{C}_2\text{H}_4$, а также смолы. Однако появляются продукты обработки материалов, содержащие углерод.

Следовательно, можно написать:

$$V_{ca}^d = \frac{C^m + C^d - (C_{cm} + C_m)}{0,536 (\text{CO}_2^d + \text{CO}^d)} \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (4)$$

Если SO_2 не определен самостоятельно, он улавливается одновременно с CO_2 . Сумма SO_2 и CO_2 обозначается как RO_2 . Учитывая вместо $\text{CO}_2 - \text{RO}_2$, следует вводить в расчет уже не C^m и C_m кг углерода, а

$$C^m + \frac{12}{32} S^m \text{ и } C^m + \frac{12}{32} S^m.$$

Тогда выражение (4) при $\text{CO}=0$ примет вид*:

$$V_{ca}^d = \frac{C^m + C_m^a + \frac{12}{32} (S^m + S^d) - (C_n + C_m)}{0,536 \text{RO}_2^d} \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (5)$$

Определение влажности газов. Влажность газов обычно определяется по балансу водорода.

В случае генераторного газа водород вносят: сухая часть топлива — H^m кг , влага топлива — $\frac{W_m}{9}$ кг и водяной пар дутья — $\frac{W_n}{9}$ кг . В V_{ca}^a м^3 сухого газа, полученных из 1 кг топлива, содержится водорода $0,0898 (\text{H}_2^a + \text{H}_2\text{S}^a + 2\text{CH}_4^a + 2\text{C}_2\text{H}_4^a)$ V_{ca}^a кг , в смолистых веществах и остатках H_{cm} кг и во влаге газа $\frac{1}{9} \text{H}_2\text{O}^a V_{ca}^a$ кг . Приравняв приход расходу, получаем балансовое уравнение откуда влажность газа:

$$\text{H}_2\text{O}^a = \frac{H^m + \frac{1}{9} (W_m + W_n) - H_{cm} - 0,0898 (\text{H}_2^a + \text{H}_2\text{S}^a + 2\text{CH}_4^a + 2\text{C}_2\text{H}_4^a) V_{ca}^a}{V_{ca}^a} \text{ кг}/\text{м}^3 \quad (6)$$

* Возможно привести к аналогичному виду и выражение (2).

Приведенное выражение может быть представлено в следующем виде:

$$H_2O^{\circ} = \frac{9 \left[H^m + \frac{1}{9} (W^m + W^n) - 0,0898 (H_2^{\circ} + H_2S^{\circ} + 2CH_4^{\circ} + 2C_2H_4^{\circ}) V_{ce}^{\circ} + H_{ce}^m V_{ce}^{\circ} \right]}{V_{ce}^{\circ}} \text{ кг/м}^3 \quad (7)$$

Если известна влажность газа H_2O° и неизвестно количество вводимого в газогенератор пара W_n , то последнее может быть определено из предыдущего выражения.

В продуктах горения твердого или жидкого топлива обычно не содержится смола, сероводород и углеводороды. С учетом влаги материалов получаем:

$$H_2O^{\circ} = \frac{9 \left(H^m + \frac{W^m}{9} + \frac{W_n}{9} + \frac{W^m}{9} - 0,0898 H_2^{\circ} V_{ce}^{\circ} \right)}{V_{ce}^{\circ}} \text{ кг/м}^3 \quad (8)$$

Если величинами W_n , W^m , H_2° можно пренебречь, то

$$H_2O^{\circ} = \frac{9 \left(H^m + \frac{W^m}{9} \right)}{V_{ce}^{\circ}} \text{ кг/м}^3$$

Определение выхода влажных газов. Очевидно, что:

$$V_{ce}^{\circ} = V_{ce}^{\circ} + \frac{H_2O^{\circ}}{0,804} V_{ce}^{\circ} \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (10)$$

$$V_{ce}^{\circ} = V_{ce}^{\circ} + \frac{H_2O^{\circ}}{0,804} V_{ce}^{\circ} \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (11)$$

где 0,804 — вес 1 м³ водяного пара в кг.

Определение расхода воздуха. Расход первичного воздуха на процесс газификации можно определить из баланса азота по данным анализа топлива и газа.

Азот вводится с топливом $\left(\frac{N^m}{1,251} \text{ м}^3 \right)$ и с воздухом $(0,79 V_a^{\circ} \text{ м}^3)$. В газе содержится $N_2^{\circ} V_{ce}^{\circ} \text{ м}^3$ азота. Приравняв приход расходу, имеем:

$$0,79 V_a^{\circ} = N_2^{\circ} V_{ce}^{\circ} - \frac{N^m}{1,251}, \quad (12)$$

$$V_a^{\circ} = \frac{N_2^{\circ} V_{ce}^{\circ} - \frac{N^m}{1,251}}{0,79} \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (13)$$

Пренебрегая малой величиной N^m , получаем:

$$V_a^{\circ} = \frac{N_2^{\circ} V_{ce}^{\circ}}{0,79} \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (14)$$

По замеренному расходу воздуха и содержанию азота в газе можно определить выход сухого газа. Он равен:

$$V_{ce}^{\circ} = \frac{0,79 V_a^{\circ} + \frac{N^m}{1,251}}{N_2^{\circ}} \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (15)$$

или

$$V_{ce}^{\circ} = \frac{0,79 V_a^{\circ}}{N_2^{\circ}} \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (16)$$

Аналогично при сжигании твердого или жидкого топлива:

$$V_a^{\circ} = \frac{N_2^{\circ} V_{ce}^{\circ} - \frac{N^m}{1,251}}{0,79} \text{ м}^3/\text{кг} \quad (17)$$

или, пренебрегая малой величиной N^m ,

$$V_a^{\circ} = \frac{N_2^{\circ} V_{ce}^{\circ}}{0,79} \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (18)$$

Зная V_a° , можно определить V_{ce}° .

Определение коэффициента избытка воздуха. По данным анализа продуктов горения коэффициент избытка воздуха α при сгорании твердого и жидкого топлива определяется по следующей формуле:

$$\alpha = \frac{21}{21 - 79 \frac{O_2^{\circ} - \frac{CO_2^{\circ}}{2} - \frac{H_2^{\circ}}{2}}{N_2^{\circ}}}. \quad (19)$$

При полном сгорании формула упрощается и имеет следующий вид:

$$\alpha = \frac{21}{21 - 79 \frac{O_2^{\circ}}{N_2^{\circ}}}. \quad (20)$$

Формулы (19) и (20) приближенные, так как в них не учтены азот, введенный топливом, и механический недожог.

Горение газообразного топлива

Состав газообразного топлива дается в объемных процентах отдельных компонентов смеси, что упрощает вычисления.

Определение выхода сухих продуктов горения. Из баланса углерода имеем:

$$0,536 (CO_2^{\circ} + CO^{\circ} + CH_4^{\circ} + 2C_2H_4^{\circ}) + C_{cm}^{\circ} + C_n^{\circ} + C_m^{\circ} = 0,536 (CO_2^{\circ} + CO^{\circ}) V_{ce}^{\circ} \quad (21)$$

$$V_{ce}^{\circ} = \frac{0,536 (CO_2^{\circ} + CO^{\circ} + CH_4^{\circ} + 2C_2H_4^{\circ}) + C_{cm}^{\circ} + C_n^{\circ} + C_m^{\circ}}{0,536 (CO_2^{\circ} + CO^{\circ})} \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (22)$$

Если вместо CO_2^0 имеется RO_2^0 , то, пренебрегая серой, содержащейся в смолистых веществах и пыли при $\text{CO} = 0$, получаем:

$$V_{ce}^0 = \frac{0,536 (\text{CO}_2^0 + \text{SO}_2^0 + \text{CO}^0 + \text{CH}_4^0 + 2\text{C}_2\text{H}_4^0 + \text{H}_2\text{S}^0) + C_{cm}^0 + C_n^0 + C_m^0 + \frac{12}{32} S_m^0}{0,536 \text{RO}_2^0} \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (23)$$

Если величинами C_{cm}^0 , C_n^0 , C_m^0 , S_m^0 , SO_2^0 и H_2S^0 можно пренебречь, имеем:

$$V_{ce}^0 = \frac{\text{CO}_2^0 + \text{CO}^0 + \text{CH}_4^0 + 2\text{C}_2\text{H}_4^0}{\text{CO}_2^0 + \text{CO}^0} \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (24)$$

Определение влажности продуктов горения. Из баланса водорода имеем:

$$0,0898 (\text{H}_2^0 + \text{H}_2\text{S}^0 + 2\text{CH}_4^0 + 2\text{C}_2\text{H}_4^0) + \text{H}_{cm}^0 + \frac{\text{H}_2\text{O}^0}{9} + \frac{W_m^0}{9} = \frac{1}{9} \text{H}_2\text{O}^0 V_{ce}^0 + 0,0898 \text{H}_2^0 V_{ca}^0, \quad (25)$$

откуда:

$$\text{H}_2\text{O}^0 = \frac{9 \left[0,0898 (\text{H}_2^0 + \text{H}_2\text{S}^0 + 2\text{CH}_4^0 + 2\text{C}_2\text{H}_4^0) + \text{H}_{cm}^0 + \frac{\text{H}_2\text{O}^0}{9} + \frac{W_m^0}{9} - 0,0898 \text{H}_2^0 V_{ce}^0 \right]}{V_{ce}^0}.$$

Если величинами H_{cm}^0 , H_2^0 и W_m^0 можно пренебречь, то:

$$\text{H}_2\text{O}^0 = \frac{9 \left[0,0898 (\text{H}_2^0 + \text{H}_2\text{S}^0 + 2\text{CH}_4^0 + 2\text{C}_2\text{H}_4^0) + \frac{\text{H}_2\text{O}^0}{9} \right]}{V_{ce}^0} \text{ кг}/\text{м}^3. \quad (26)$$

Определение выхода влажных продуктов горения. Выход влажных газов:

$$V_{вв}^0 = V_{ca}^0 + \frac{\text{H}_2\text{O}^0 V_{ce}^0}{0,804} \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (27)$$

Определение расхода воздуха. Баланс азота приводит к равенству:

$$\text{N}_2^0 + 0,79 V_a^0 = \text{N}_2^0 V_{ce}^0. \quad (28)$$

Откуда:

$$V_a^0 = \frac{\text{N}_2^0 V_{ce}^0 - \text{N}_2^0}{0,79} \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (29)$$

* Наличие в газе более сложных углеводородов приводит к добавлению новых слагаемых.

Определение коэффициента избытка воздуха. Величина α определяется из выражения:

$$\alpha = \frac{21 \left(1 + \frac{\text{N}_2^0}{\text{O}_2 \text{min}} \cdot \frac{\text{O}_2^0 - 0,5 \text{CO}^0 - 0,5 \text{H}_2^0}{\text{N}_2^0} \right)}{21 - \frac{79(\text{O}_2^0 - 0,5 \text{CO}^0 - 0,5 \text{H}_2^0)}{\text{N}_2^0}}, \quad (30)$$

где $\text{O}_2 \text{min}$ — количество кислорода, теоретически необходимого для полного сжигания сухого газа в $\text{м}^3/\text{м}^3$.

При полном сгорании формула упрощается и имеет следующий вид:

$$\alpha = \frac{21 \left(1 + \frac{\text{N}_2^0 \text{O}_2^0}{\text{O}_2 \text{min} \text{N}_2^0} \right)}{21 - \frac{79 \text{O}_2^0}{\text{N}_2^0}}. \quad (31)$$

Величина α может быть также определена по соотношению количеств азота, фактически введенного при горении и вводимого при $\alpha = 1$:

$$\alpha = \frac{21 (\text{N}_2^0 V_{ce}^0 - \text{N}_2^0)}{79 [0,5 \text{CO}^0 + 1,5 \text{H}_2\text{S}^0 + 0,5 \text{H}_2^0 + 2\text{CH}_4^0 + 3\text{C}_2\text{H}_4^0 + (m + 0,25n) \text{C}_m\text{H}_n^0]}. \quad (32)$$

Определение количества присосанного воздуха. При определенных расчетом или непосредственно замеренных количествах проходящих газов присос воздуха устанавливаются по разности объемов проходящих газов или по анализу газов.

Предположим, что состав (в %) сухих отходящих газов до присоса следующий: CO_2^0 , CO^0 , O_2^0 , H_2^0 , N_2^0 . На 100 объемов отходящих газов присасывается «а» объемов воздуха и сгорает «б» объемов CO и «в» объемов H_2 .

Тогда на 100 начальных объемов отходящих газов получится:

$$\begin{aligned} & \text{CO}_2 \dots \text{CO}_2^0 + \delta \\ & \text{CO} \dots \text{CO}^0 - \delta \\ & \text{O}_2 \dots \text{O}_2^0 + 0,21 \alpha - \frac{\delta}{2} - \frac{\epsilon}{2} \\ & \text{H}_2 \dots \text{H}_2^0 - \epsilon \\ & \text{N}_2 \dots \text{N}_2^0 + 0,79 \alpha \\ & \text{Всего } 100 + \alpha - \frac{\delta}{2} - \frac{3\epsilon}{2} \end{aligned}$$

Состав (в %) отходящих газов после присоса: CO_2^0 , CO^0 , O_2^0 , H_2^0 , N_2^0 причем:

$$CO_2^* = \frac{CO_2^* + \delta}{100 + a - \frac{\delta}{2} - \frac{3\delta}{2}} 100\% \quad (33a)$$

$$CO^* = \frac{CO' - \delta}{100 + a - \frac{\delta}{2} - \frac{3\delta}{2}} 100\% \quad (33b)$$

$$H_2^* = \frac{H_2' - \delta}{100 + a - \frac{\delta}{2} - \frac{3\delta}{2}} 100\% \quad (33в)$$

По составу отходящих газов до и после присоса «б» и «в» могут быть определены из выражений:

$$\delta = \frac{CO_2^* \cdot CO' - CO^* \cdot CO_2^*}{CO_2^* + CO^*} \quad (34)$$

$$\epsilon = \frac{CO_2^* \cdot H_2' - CO_2^* \cdot H_2^* - \delta H_2^*}{CO_2^*} \quad (35)$$

Если δ и ϵ равны нулю, что справедливо при отсутствии дгорания газов, получаем:

$$100 CO_2^* + a CO_2^* = 100 CO_2^*$$

откуда

$$a = \frac{CO_2^* - CO_2^*}{CO_2^*} 100\% \quad (36)$$

Присос в процентах конечного количества сухих газов:

$$\frac{a}{100 + a - \frac{\delta}{2} - \frac{3\delta}{2}} 100\%$$

Присос в процентах количества газов после присоса при δ и ϵ равных нулю:

$$\frac{a}{100 + a} 100 = \frac{CO_2^* - CO_2^*}{1 + \frac{CO_2^* - CO_2^*}{CO_2^*}} = \frac{CO_2^* - CO_2^*}{CO_2^*} 100\% \quad (37)$$

Составление материального и теплового баланса и определение к. п. д. печи и сушилок

Для установления распределения тепла, а следовательно, учета отдельных потерь, оценки способов и путей уменьшения расхода тепла и увеличения к. п. д. составляют тепловой баланс печи и сушилки в целом и отдельных частей. Составление теплового баланса базируется на данных материального баланса.

Границы балансов. Баланс может быть отнесен как ко всей установке в целом, так и к отдельным элементам.

Для печей наиболее важным является составление баланса

рабочей камеры и приспособлений для использования тепла отходящих газов, для сушилок—лишь рабочей камеры.

Баланс рабочей камеры составляется в целях характеристики работы этого наиболее важного элемента печи и сушилки.

Баланс приспособлений для использования тепла отходящих газов позволяет определить их экономичность.

Баланс других элементов печи и сушилок дает возможность установить ряд вспомогательных данных: потери тепла этими элементами, присос воздуха или утечку газов и т. д.

Материальный баланс. В материальном балансе сопоставляют количества вводимых и отводимых веществ. Можно относить материальный баланс к элементам веществ и к соединениям.

При сопоставлении материального баланса горения топлива в процессе учитывают вводимое топливо, пар и воздух и в расходе—продукты горения, подсосанный воздух и остатки от горения. Кроме того, учитываются продукты разложения и сушки обрабатываемых материалов и продукты взаимодействия материалов с топливом и продуктами горения. Обычно баланс составляется по элементам. При известных выходе газа, расходе воздуха и т. д. для нахождения содержания элементов в газах пользуются уже известными формулами, а именно:

содержание углерода в горячем газе:

$$0,536 (CO_2^* + CO^* + CH_4^* + 2C_2H_6^*) \text{ кг/м}^3 \text{ газа;}$$

содержание углерода в продуктах горения:

$$0,536 (CO_2^* + CO^*) V_{c,г}^0 \text{ кг/кг топлива.}$$

содержание в продуктах горения:

$$\text{кислорода } 1,429 (CO_2^* + 0,5 CO^* + SO_2^*) V_{c,г}^0 \text{ кг/кг топлива}$$

$$\text{азота } 1,251 N_2^* \cdot V_{c,г}^0 \text{ кг/кг топлива}$$

$$\text{водорода } 0,0898 H_2^* V_{c,г}^0 \text{ кг/кг топлива}$$

Тепловой баланс. В тепловом балансе учитывают количества вводимого и расходуемого тепла и распределение их по отдельным статьям.

Сопоставление теплового баланса основывается на законе сохранения энергии. Вводимое и расходуемое тепло учитывают применительно к принятым границам баланса. В соответствии с законом академика Гесса расход тепла определяется начальным и конечным состоянием.

Методика составления баланса печи дана в главе XI, а сушилок—в главе XII. При составлении баланса по данным испытания пользуются замеренными величинами или определенным расчетом по формулам. В частности, при проведении испытания в тепловом балансе учитывают измеренные количества отходящих газов и воздуха для горения или рассчитанные по

определенному составу отходящих газов и топлива. При составлении теплового баланса сушилки обычно пользуются замером параметров поступающих и выходящих из нее газов.

Определение к. п. д. Коэффициент полезного действия печи обычно выражается отношением полезно использованного тепла к затраченному. Ввиду того, что в отдельных случаях количества тепла, которые можно считать полезно использованными и затраченными, различны, к. п. д. является условной величиной. В соответствующих главах определение уточняется для отдельных частных случаев.

В отношении сушилок обычно не пользуются понятием к. п. д. и ограничиваются оценкой величины удельных расходов тепла и воздуха.

4. ИСПЫТАНИЕ ПЕЧЕЙ И СУШИЛОК

Текущий контроль работы газогенераторов, печей и сушилок при условии достаточно тщательного его осуществления, особенно с помощью автоматических регистрирующих приборов, дает материал, достаточный для учета и контроля работы установки и общей характеристики протекающих процессов.

В некоторых случаях производят специальные теплотехнические испытания печей и сушилок. Испытание дает материал для оценки качества работы установки и способов улучшения ее работы. Целью испытания может быть, например, определение к. п. д., уточнение отдельных статей расхода тепла по печи и сушилке в целом и по отдельным их частям и просто фиксирование показателей.

В отдельных случаях испытания производятся для выявления причин неполадок. Причины неполадок, связанные с обогревом печи и движением газов, обычно выявляются с помощью анализа газов, замеров температур и давлений. В этих случаях часто не требуется полных испытаний и составления балансов, а нужно только обнаружить и проанализировать показательные отклонения.

Специальные исследования производят, если необходимо выявить влияние на работу печей или сушилок особенностей режима или их конструкций и исследовать новые звенья.

Иногда производят так называемые парадные испытания, при которых создают благоприятные эксплуатационные условия, чтобы достигнуть особо высококачественных показателей работы. Подобные испытания производят для установления предельно возможной производительности или показателей при переходе на другие виды топлива.

Печи и сушилки испытывают при установившейся работе и в случае непрерывного действия—при постоянном режиме.

Весьма важно сохранить неизменное состояние печи и сушилки в начале и в конце испытания. Поэтому в установках периодиче-

ского действия контролируемый период должен быть равен одному или нескольким полным циклам работы.

В случае несовпадения отдельных показателей состояния печи к началу и концу испытания должны быть введены соответствующие поправки (изменения теллосодержания кладки и материалов и т. д.).

Продолжительность испытания должна быть такова, чтобы отдельные неточности или отклонения от средних показателей не могли чрезмерно повлиять на результат. Для установок непрерывного действия длительность испытаний составляет не менее суток, а при ответственных испытаниях—и больше.

При испытаниях необходимо учитывать количество загружаемых материалов и продукции. Как правило, учет ведут по весу и лишь в крайнем случае—по объему. Все отходы и остатки должны быть учтены. Сопоставление количеств загруженных материалов и продукции должно дать удовлетворительную сходимость.

При испытаниях необходимо учитывать количество, состав, температуру и тепловорную способность топлива, состав и температуру отходящих газов, количество и температуру поступающего воздуха и пара и помимо количества также состав и температуру загружаемых в печь или сушилку сырых материалов и продукции.

Для составления материального и теплового балансов печи достаточно измерить количество, состав и температуру веществ у границ, к которым отнесен баланс.

Детальная характеристика работы отдельных частей печи (например, регенераторов), или изотермического поля в обрабатываемом материале, или протекания горения требует специальных исследований.

5. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

Показатели, характеризующие тепловые процессы, протекающие в печи и сушилке, как температура, соотношение топлива и воздуха, тепловорная способность топлива, давление, влажность газов и т. д., подвержены колебаниям, и для их поддержания на требуемом уровне необходимо соответствующее регулирование.

Регулировать можно вручную и автоматически. Недостаток ручного регулирования заключается в том, что оно производится лишь тогда, когда изменение состояния достигло известного предела или даже вызвало нежелательные последствия.

При автоматическом регулировании регулятор быстро возвращает их к исходным значениям, а в случае умышленного изменения изменений регулируемых показателей регулятор изменяет и другие величины одного из регулируемых показателей и стабилизирует. Автоматическое регулирование обеспечивает стабильность режима или необходимую постепенность его изменения. Авто-

математическое регулирование не устраняет необходимости зазора за печью и сушилкой и влияния конструктивных дефектов. Автоматизируют работу хорошо работающих печей и сушилок с целью ее дальнейшего улучшения.

Целесообразна полная автоматизация работы установки для того, чтобы нерегулируемые показатели не уменьшили влияния регулирования.

Автоматизация обуславливает уменьшение расхода топлива и отступов, уменьшение стоимости ремонтов и увеличение производительности печи, уменьшение расхода тепла и высокое качество продукции.

Чем чувствительнее автоматический регулятор, тем быстрее он реагирует на отклонение системы от нормального состояния. Чувствительность регулятора характеризуется отклонением контролируемого показателя, необходимым для начала регулирования (в мм вод. ст. или град.).

Требования к регуляторам в отношении чувствительности устанавливаются в каждом отдельном случае в зависимости от требований установки. Обычно избегают применения регуляторов большой чувствительности, так как они имеют слишком сложную конструкцию.

В состоянии равновесия регулятора положение установочного прибора, непосредственно производящего изменение в регулируемой системе, должно в точности соответствовать оптимальному значению контролируемого показателя.

Скорость перестановки установочного прибора (вентиль, дроссельный клапан, шибер и т. д.) регулятором тем больше, чем скорее происходит корректирующее влияние регулятора.

При слишком быстром воздействии регулятора на установочный прибор вследствие инерции движущихся масс может произойти переход состояния в направлении, противоположном вызвавшему действие регулятора. Это, в свою очередь, вызовет работу регулятора в противоположном направлении и новый переход линии среднего состояния и т. д., т. е. может произойти постоянное колебание воздействия регулятора — перерегулирование.

При хорошем регуляторе по достижении нормального состояния регулирующее воздействие должно прекратиться.

Для регуляторов давления, тяги и соотношения, если только движущаяся масса не велика, не требуется особых мер, предупреждающих перерегулирование. При контроле процессов, связанных с тепловой инерцией печей, кладка и содержимое которых аккумулируют большие количества тепла, большая скорость воздействия нежелательна и требуется постепенное регулирование. Соответственно применяют регуляторы двухпозиционные и со следящим регулированием. Двухпозиционные регуляторы регулируют режим лишь после того, как отклонение показателя достигает заранее установленной

величины. Регуляторы со следящим регулированием учитывают степень отклонения контролируемого параметра и регулируют постепенно. Постепенность регулирования обеспечивается обратным ходом регулятора, т. е. установкой его после некоторого регулирующего действия в среднее положение (регулирование толчками или с перерывами).

Конструкция регулятора должна допускать свободное изменение требуемых значений регулируемых показателей в процессе работы. Регулятор должен легко выключаться, быть безопасным, нетребовательным в отношении обслуживания и легко доступным.

Различают регуляторы прямого и косвенного действия.

В регуляторе прямого действия изменения регулируемого показателя вызывает усилие, необходимое для совершения регулирующего действия. Эти регуляторы состоят из воспринимающего органа и установочного механизма (прибора), приводимого в движение воспринимающим органом.

Если импульс, возникающий вследствие изменения измеренной и регулируемой величины, недостоючен для непосредственной перестановки регулирующего приспособления, то он усиливается с помощью вспомогательных сил, которыми он управляет. Подобные регуляторы называют регуляторами с усилением или регуляторами косвенного действия. Они состоят из воспринимающего органа, реагирующего на изменение регулируемого показателя, управляющего механизма, с помощью которого осуществляется управление вспомогательной силой, приводящей в действие силовой механизм, и установочного механизма (непосредственно вызывающего изменение состояния).

Для создания вспомогательной силы используют воздух, масло, воду, находящиеся под давлением, электрическую энергию и т. д. Регуляторы с многократным усилением снабжают несколькими управляющими механизмами.

Воспринимающие органы регуляторов давления, смещения и соотношения выполняются в виде различного типа аппаратов для измерения давления: колокольного, поплавкового и мембранного, а регуляторов температуры — в виде термостатов расширения.

Управляющие механизмы могут выполняться золотниковыми с рычажным воздействием, в виде струйной трубки или отражательной пластинки, электромагнитными и электрическими.

Автоматический регулятор (рис. 176) давления газа, поступающего в печь, устанавливается на газопроводе до газового вентиля. Этот регулятор давления поддерживает определенное давление в газопроводе и обеспечивает равномерное поступление газа в печь. Он устраняет влияние изменений режима газогенератора. Импульсом служит давление в газопроводе. Установка таких регуляторов широко практикуется.

В этом регуляторе жидкость подается под давлением через струйную трубку 1 по обе стороны поршня 5. Если давление в газопроводе отклонилось от нормы, мембрана 4 перемещает

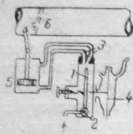


Рис. 176. Автоматический регулятор давления:

1—струйная трубка, подающая жидкость под давлением, 2—шпала ось трубки, 3—отверстие, подающее жидкость в шпала ось, 4—мембрана, отклоняющаяся в зависимости от величины контролируемого давления струйную трубку 1, 5—рабочий поршень, перемещающийся при изменении давления с одной стороны, 6—дрессельный клапан, перекрываемый поршнем 5.

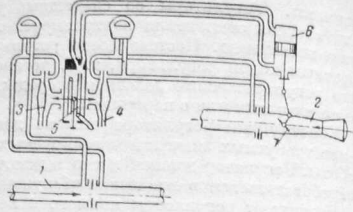


Рис. 177. Схема установки регулятора соотношения количества газов:

1, 2—газопроводы, 3, 4—мембраны, воспринимающие равенство давления до и после диафрагмы (учитывающие протекающее количество газов), 5—струйная трубка, подающая жидкость под давлением и отклоняющаяся под действием мембран 3 и 4, 6—шпала ось трубки, переставляющей под действием напорной жидкости клапан 7 газопровода.

струйную трубку, жидкость в большем количестве поступает по одну сторону поршня, который передвигается и переставляет задвижку в газопроводе, восстанавливая требуемое давление.

Дополнительная регулировка производится от руки вентилем.

Автоматическое регулирование тяги обеспечивает постоянство давления в рабочей камере и устраняет влияние изменений нагрузки (подача газа и воздуха) и атмосферных влияний. Импульсы для работы регулятора желательно брать из рабочей камеры (например, у свода, где давление максимально).

Автоматические регуляторы соотношения (рис. 177) устанавливают определенное соотношение горючего и воздуха и обеспечивают экономичное горение (отсутствие потерь вследствие значительного недожога или избытка воздуха) и устраняют опасность получения разрушающего кладку острого пламени.

Обычно такие регуляторы получают импульсы в результате прохождения горючего и воздуха через дроссельные отверстия в печь жидкого топлива и применяются в случае подачи и воздуха под давлением.

Автоматические регуляторы температуры обеспечивают стабильность режима в печи и сушилке, позволяют поддерживать режим в состоянии, обеспечивающем необходимую передачу тепла, и в то же время не допускают излишнего износа или пережога кладки. Установка этих регуляторов, чрезвычайно важная для улучшения работы печи, осложняется большой тепловой инерцией печи, влиянием на температуру в печи многих факторов

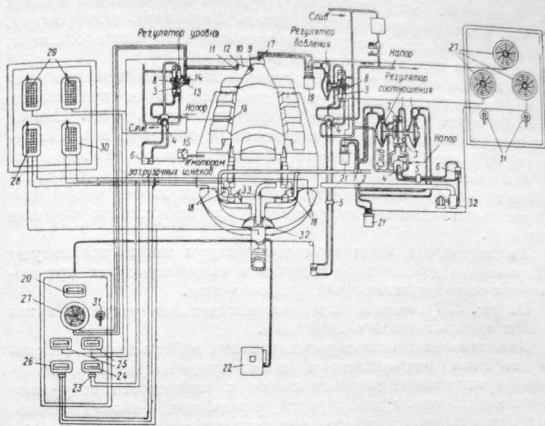


Рис. 178. Схема автоматического регулирования стекловаренной печи:

1—диафрагма на газопроводе, 2—диафрагма на воздухопроводе, 3—струйная трубка, 4—кран дистанционного управления, 5—клапан отклонения регулятора, 6—шпала ось трубки, 7—поршень, 8—пружинный задатчик, 9—шамовый поплавок, 10—рычаг, 11—солонид передаточного прибора, 12—рычаг передаточного прибора, 13—солонид приемного прибора, 14—солонид приемного прибора, 15—рычаг, 16—рычаг, 17—термометр дистанционной-плавильной, 18—термометр, 19—радиационный параметр, 20—датчик температуры, 21—датчик температуры, 22—датчик температуры, 23—датчик температуры, 24—датчик температуры, 25—датчик температуры, 26—датчик температуры, 27—датчик температуры, 28—датчик температуры, 29—то же, односторонний, 30—то же, односторонний, 31—рукоятка крана дистанционного управления, 32—воздушный вентилятор для подачи дутья в печь.

(подогрева газа и воздуха, потерь в окружающую среду, притока воздуха, изменения характера пламени) и трудно точно измерить температуру. Обычно изменение температуры дает импульсы, влияющих на подачу топлива.

В сушилках периодического действия применяют автоматы так называемого программного регулирования, воспроизводящие заданную кривую влаготдачи изделий путем изменения во времени температуры и влажности газов.

Аналогичные регуляторы, обеспечивающие определенный температурный и другие режимы, применяют и в печах периодического действия.

Для автоматического регулирования температуры применяют электрические регуляторы с прерывающимся регулированием или с измерением скорости изменения регулирующего импульса.

В СССР создан терморегулятор Фильера. Он может одновременно регулировать температуру во многих точках с разной

температурой. Такой прибор очень удобен при наличии многих точек, в которых нужно поддерживать постоянную температуру. Прибор снабжается следящей регулировкой—приспособлением, измеряющим степень отклонения показания.

Возможно автоматическое регулирование переключения клапанов в регенеративных печах, избавляющее от применения ручного труда и производимое из центрального пункта. Самый перевод производится не в зависимости от времени, а в зависимости от режима, что позволяет обеспечить более равномерный режим печи. Целесообразно использовать в качестве импульса температуры нагреваемых или охлаждаемых газов, чтобы при значительном охлаждении регенераторов происходил перевод клапанов.

Автоматические регуляторы температуры также используют для контроля добавки пара к дутью в газогенераторах при получении переводоздушного генераторного газа.

На рис. 178 показана схема автоматического регулирования работы стекловаренной ванны печи.

В схеме автоматического регулирования работы ванны стекловаренной печи непрерывного действия предусматривается включение и выключение загрузки шихты в зависимости от уровня зеркала стекломассы; измеряемого уровнемером, и автоматическое поддержание определенного соотношения топлива и воздуха, температуры и давления в печи. Температуру регулируют путем изменения подачи топлива. При этом предусматривается, что давление в печи и теплотворная способность газа будут автоматически поддерживаться на определенном уровне. Давление поддерживается постоянным путем перестановки дымового шибера в зависимости от давления в газовом пространстве студной части. Автоматическое регулирование также предусматривает перевод клапанов регенеративных печей в зависимости от их температурного режима или времени.

Система комплексного автоматического регулирования работы вращающейся печи сводится к следующему. Скорость вращения печи постоянна и синхронизирована с подачей материала путем электрической связи приводов печи и питателя. Подача топлива регулируется в зависимости от изменения температуры материала в зоне спекания.

Температура материала измеряется радиационным пирометром, импульс от которого воздействует на число оборотов угленосного механизма дроссели в трубопроводе первичного воздуха.

Таким образом, подача первичного воздуха связывается с подачей топлива. Регулирование подачи вторичного воздуха осуществляется с помощью шибера дымососа, от импульса радиационного пирометра, т. е. пропорционально подаче топлива.

ЛИТЕРАТУРА

I. К главе первой

1. М. А. Глишков. Методы расчета промышленных печей. ОНТИ, НКТП СССР, 1938.

II. К главе второй

1. И. С. Назаров. Основы теории промышленных печей, Metallurgizdat, 1941.
2. Н. Н. Доброхотов. Механика газов в Сименс-Мартеновских печах, Metallurgizdat, 1926, 4.
3. В. Е. Грум-Гржимайло. Пламенные печи. Издание Теплового института, 1925.
4. Г. Н. Абрамович. Турбулентные свободные струи жидкостей и газов. Госэнергоиздат, 1943.
5. М. А. Глишков. Труды Уральского индустриального института имени С. М. Кирова 1945, вып. XX.
6. В. Н. Тимофеев и П. И. Сычев. Сборник научно-исследовательских работ Уральского отделения ВТИ—Повышение экономичности и производительности нагревательных и мартеновских печей, Metallurgizdat, 1940.
7. Г. П. Иванов. Работы Стальпрокта. Вопросы движения газов в печах, 1936.
8. И. М. Федоров. Сборник—Современные проблемы сушильной техники, в. 2, 1941.
9. Г. А. Мурын. Гидравлическое сопротивление стальных труб. Известия ВТИ, 1948, 10.

III. К главе третьей

1. М. В. Кирпичев, М. А. Михеев и Л. С. Эйгенсон. Теплопередача, ГЭИ, 1940.
2. М. А. Михеев. Основы теплопередачи, ГЭИ, 1947.
3. Д. В. Будрин и Б. А. Красовский. Труды Уральского индустриального института, 1941, вып. XVII, 18.
4. В. Н. Тимофеев. Сборник научно-исследовательских работ Уральского отделения ВТИ—Повышение экономичности и производительности нагревательных и мартеновских печей, Metallurgizdat, 1940.
5. М. А. Глишков. Мартеновская печь как теплотехнический агрегат, Metallurgizdat, 1944.
6. Б. И. Китаев. Теплообмен в шахтных печах, Metallurgizdat, 1945.
7. Д. Б. Гинзбург—см. XII, 1.
8. В. Н. Тимофеев. Теплообмен в слое. Известия ВТИ, 1949, 2.

IV. К главе четвертой

1. Н. Н. Доброхотов. К динамике диффузионных процессов, издательство Академии наук УССР, 1948.
2. Д. А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике, издательство Академии наук СССР, 1947.

V. К главе пятой

1. В. П. Личевский и Я. Топливо и его сжигание, Metallurgizdat, 1947.
2. В. Ф. Копытов, В. Н. Соколов, Д. И. Лосыков, В. А. Куроедов. Сборник—Печи для нагрева металла, под редакцией Н. Н. Доброхотова, ГНТИ машиностроительной литературы, 1941.

VI. К главе шестой

1. Д. Б. Гинзбург. Газификация топлива и газогенераторные установки, ч. I, Газлепром, 1938.
2. Д. Б. Гинзбург. Газогенераторные установки, ч. II, Газлепром, 1937.
3. Д. Б. Гинзбург. Газогенераторы и газовое хозяйство в стекольной и керамической промышленности, Промстройиздат, 1949.
4. Д. Б. Гинзбург. Журнал «Стекольная и керамическая промышленность», 1947, 9.

VII. К главе седьмой

1. А. П. Кузнецов и Н. Г. Веселков. Сборник—Печи для нагрева металла, под редакцией Н. Н. Доброхотова, ГНТИ машиностроительной литературы, 1941.
2. С. С. Берман. Рекуперативные печи стекольной промышленности, Газлепром, 1938.
3. М. А. Михеев—см. III, 2.
4. В. П. Тебенков. Чугунные рекуператоры для нагревательных печей. Стройиздат, 1948.

VIII. К главе восьмой

1. Д. Б. Гинзбург—см. VI, 1; XIII, 1,2.

IX. К главе девятой

1. Н. П. Будников. Технология керамических изделий, Стройиздат, 1946.
2. Д. И. Перевалов. Технология огнеупоров, Metallurgizdat, 1949.
3. А. К. Сильницкий. Детали обмуровки, Госэнергоиздат, 1948.

X. К главе десятой

1. Д. В. Будрин. Сборник—Печи для нагрева металла, под редакцией Н. Н. Доброхотова, ГНТИ машиностроительной литературы, 1941.
2. Под редакцией Оляшанского. Практическая электротермия.

XI. К главе одиннадцатой

1. М. А. Глишков—см. I, 1.
2. Сборник научно-исследовательских работ Уральского отделения ВТИ—Повышение экономичности и производительности нагревательных и мартеновских печей, под редакцией В. Н. Тимофеева, Metallurgizdat, 1940.
3. Д. В. Гинзбург—см. XIII, 1.
4. В. А. Кузьяк и А. А. Сухов. Теплотехнические расчеты в производстве стекла, Газлепром, 1940.
5. В. Н. Тимофеев. Известия ВТИ, 1946, 6.

XII. К главе двенадцатой

1. М. Ю. Лурье. Сушильное дело, Госэнергоиздат, 1948.
2. К. А. Нохратян. Искусственная сушка в керамической промышленности, части I и II, 1938.

3. Труды Всесоюзной конференции по усовершенствованию сушильных процессов в керамической промышленности, ВНИТО силикатчиков Ленинград, 1948 г. (в печати).
4. Н. Н. Доброхотова—см. IV, 1.
5. А. В. Лыков и Л. Я. Аугарман. Теория суши и капиллярно-пористых коллоидных материалов пищевой промышленности, Пищепромиздат, 1946.
6. Д. Б. Гинзбург, В. К. Дейнека, К. А. Нохратян. Печи и сушила в силикатной промышленности, Газлепром, 1940.
7. И. М. Фальковский. Курс сушил, Госэнергоиздат, 1935.
8. П. Д. Лебедев и А. А. Щукин. Фабрично-заводская теплотехника, Госэнергоиздат, 1948.
9. Т. К. Шервуд. Сушка твердых тел, Гослестехиздат, 1945.

XIII. К главе тринадцатой

1. Д. Б. Гинзбург. Стекловаренные печи, Газлепром, 1948.
2. Технология стекла, под редакцией И. И. Князгородского, Газлепром, 1939.
3. Термокинематическая характеристика стекломассы в ваннах печах, сборник под редакцией М. Г. Степаненко, Газлепром, 1938.
4. С. С. Берман. Атлас «Конструктивные чертежи ванн печей», Газлепром, 1937.

XIV. К главе четырнадцатой

1. В. И. Юнг. Введение в технологию цемента, Стройиздат, 1938.
2. Е. И. Ходоров. Теплопередача во вращающейся печи, Труды Гипроцемента, вып. X, 1949.
3. Е. И. Ходоров и П. М. Димент. Теплопередача в пещной зоне вращающихся печей, Цемент, 1947, 3.
4. Е. И. Ходоров. Малогабаритная автоматическая шахтная печь, Цемент, 1947, 2.
5. Труды Гипроцемента, вып. VIII, 1948.
6. В. К. Дейнека—см. XII, 6.
7. Е. И. Ходоров. Цемент, 1947, 9 и 1948, 1.
8. Е. И. Ходоров. Теплотехническое испытание печей цементной промышленности, Гипроцемент, 1937.
9. Л. А. Вулис. Журнал технической физики, т. XVI, вып. I, 1949.

XV. К главе пятнадцатой

1. П. П. Будников—см. IX, 1.
2. П. И. Перевалов—см. IX, 2.
3. И. А. Булавин. Теплотехника в тонкой керамике, издательство НКМП РСФСР, 1938.
4. Л. Г. Вейнруб, В. Д. Моро, И. И. Палеев, З. М. Рутман. Рационализация печей керамической промышленности, Госстройиздат, 1934.
5. Справочник «Огнеупоры» т. II, под ред. Г. О. Гросса, Госстройиздат, 1939.

XVI. К главе шестнадцатой

1. Г. Ф. Кнорре. Тепловые расчеты по газовому анализу, Госэнергоиздат, 1947.
2. В. П. Преображенский. Теплотехнические измерения и приборы, ГЭИ, 1946.
3. М. Г. Степаненко. Теплотехнический контроль в стекольной промышленности, Газлепром, 1936.
4. Д. В. Гинзбург—см. VI, 2.
5. Д. В. Гинзбург—см. XIII, 1.
6. В. А. Карякин. Графический расчет простейшего неполного горения любого топлива, ГОНТИ НКТП СССР, 1938.
7. В. Г. Гутоп. Автоматическое регулирование и контроль процессов в производстве стекла, Промстройиздат, 1949.

Введение. Значение тепловых процессов в силикатной промышленности (Д. Б. Гинзбург) 3

Глава первая. Общие понятия о печах (Д. Б. Гинзбург)

1. Процессы, протекающие в печах 5
2. Устройство и работа печей 7
 - Температурный и тепловой режимы печей 7
 - Источники тепла 8
 - Передача тепла 8
 - Устройство рабочей камеры 10

Глава вторая. Механика газов (Д. Б. Гинзбург)

1. Свойства газообразных тел 12
2. Некоторые законы, применяемые в механике газов 13
3. Препятствия напорам 19
4. Характер движения газов 20
5. Сопротивления движению газов 21
 - Сопротивление от трения 20
 - Местные сопротивления 22
6. Сопротивление заполнений 24
7. Истечение газа через отверстия, насадки и сопла 26
8. Свободное и несвободное движение газов 27
9. Движение газов в печных полостях 28
 - Естественное и принудительное движение газов 31
 - Движущая сила 31
 - Направление и скорость газов 33
 - Направление разделенного вертикального потока газа 34
10. Приспособления для транспорта газа 36
 - Дымовые трубы 38
 - Искусственная тяга 38
 - Эжекторы 41
 - Вентиляторы 41
11. Моделирование движения газов 45

Глава третья. Теплообмен в рабочей камере (Д. Б. Гинзбург)

1. Теплообмен в пламенном пространстве 48
2. Нагревание и охлаждение тел 58
3. Теплообмен в слое 63

Глава четвертая. Диффузионные процессы (Д. Б. Гинзбург)

1. Скорость физико-химического гетерогенного процесса 65
2. Скорость диффузионных процессов 65
3. Смешение газовых струй и горение газа 68

Глава пятая. Топливо и его сжигание (Д. Б. Гинзбург)

1. Виды топлива 74
2. Процессы, протекающие при горении топлива 74
3. Температура горения 74
4. Горение твердого топлива 75
5. Конструкции топок для твердого топлива 76
6. Горение газообразного и жидкого топлива 79
7. Приспособления для сжигания жидкого топлива 83
8. Газовые горелки 84
9. Горение шлефовидного топлива 96
10. Горелки для пылевидного топлива 97

Глава шестая. Газификация топлива (Д. Б. Гинзбург)

1. Теоретические основы процесса газификации 98

Сущность процесса газификации	98
Воздушный газ	100
Водяной газ	102
Паровоздушный газ	103
Регенеративный газ	104
Пароокислородный газ	105
Процессы, протекающие в верхней части шахты газогенератора	106
Газогенераторы с естественной тягой и искусственным дутьем	106
Устройство шахт	110
Газогенераторы с разложением смол	110
Газогенераторы с получением смол повышенного качества	112
Газогенераторы для получения водяного газа	112
Газогенераторы для получения двойного водяного газа	113
Газогенераторы с выпуском жидкого шлака	114
Подземная газификация угля	115
Колосниковые решетки газогенераторов	115
Газогенераторы с неподвижными решетками	116
Газогенераторы с вращающимися решетками	116
Загрузочные приспособления	118
Механические шпуровочные приспособления	120
Приспособления, предупреждающие выбивание газа	121
3. Очистка газа	122
Сухая очистка газа	122
Мокрая очистка газа	123
4. Подача топлива	132
5. Подача воздуха, газа и пара	132
6. Расчет числа и размеров газогенераторов и состава газа	135
Определение числа газогенераторов	135
Расчет состава газа и размеров газогенератора	136

Глава седьмая. Приспособления для использования тепла отходящих газов (Д. Б. Гинзбург)

1. Способы использования тепла отходящих газов	143
2. Рекуператоры	144
Теплообмен в рекуператорах	144
Устройство рекуператоров	144
Керамические рекуператоры	145
Металлические рекуператоры	146
Расчет рекуператора	147
3. Регенераторы	153
Теплообмен в регенераторах	153
Устройство регенераторов	154
Расчет регенераторов	156
Распределение отходящих газов	158
Коэффициент теплообмена	159
Поверхность нагрева	161
Сопротивление насадок	162
4. Котлы-утилизаторы	162
5. Другие способы использования тепла	166

Глава восьмая. Газопроводы и клапаны (Д. Б. Гинзбург)

1. Газопроводы	167
Газопроводы для очищенного газа	167
Газопроводы для неочищенного газа	167
2. Воздухопроводы	168

3. Дымовые каналы	168
4. Клапаны	169
Виды клапанов	169
Клапаны для включения, выключения и регулирования	169
Предохранительные клапаны	170
Переводные клапаны	171

Глава девятая. Кладка и обвязка печей (Д. Б. Гинзбург)

1. Кладка печей	173
2. Тепловая работа кладки	175
3. Разъединение кладки	176
4. Прочность кладки	176
5. Огнеупорные материалы	177
Прочность под нагрузкой	177
Химическая стойкость	180
Термическая стойкость	180
Постоянство объема при высоких температурах	180
Динас	181
Шамот	181
Подукислый материал	181
Песчаник	181
Магнезит	181
Тальк	182
Клинкерный бетон	182
Высокоглиноземистые материалы	182
6. Теплоизоляционные материалы	183
7. Обвязка	183
8. Фундаменты	186

Глава десятая. Электронагревательные элементы печей (Д. Б. Гинзбург)

1. Дуговые печи	187
2. Печи сопротивления	187
Печи косвенного нагрева	187
Печи прямого нагрева	189
3. Индукционные печи	190

Глава одиннадцатая. Определение размеров рабочей камеры и расхода топлива (Д. Б. Гинзбург)

1. Выбор типа печи и вида топлива	192
2. Расчет печи	192
Определение размеров рабочей камеры	192
Определение расхода топлива	193
Составление теплового баланса	194
Определение сопротивлений на пути газов	200

Глава двенадцатая. Процесс сушки и сушилки (А. Ф. Чижский, под редакцией действит. чл. АН УССР И. Н. Доброхотова)

1. Значение сушки изделий и материалов в силикатной промышленности	202
2. Параметры влажного воздуха	204
3. Статика сушильных процессов	208
Материальный баланс	208
Баланс тепла	210
Id-диаграмма	213
Расчет сушилок по Id-диаграмме	217
Рециркуляция газов и ее значение в сушилках и низкотемпературных печах	220
4. Виды влаги и ее связь с материалом	223
5. Динамика сушки	225

Процесс испарения влаги со свободной поверхности	225
Процесс сушки керамических изделий	227
Диффузия влаги внутри	230
Коэффициент внутренней диффузии влаги	231
Термолагодородность в глине	233
Усадочные напряжения и деформации при сушке	234
Скорость сушки	238
Критическая и конечная влажность изделий	242
Сущна зернистость материала в слое	244
Чувствительность глины к сушке	246
Продолжительность сушки	248

6. Классификация сушилок	251
7. Требования, предъявляемые к сушилкам	252
8. Атмосферные сушилки непрерывного действия	253
Барabanные сушилки	253
Туннельные сушилки	256
Конвейерные сушилки	258
9. Атмосферные сушилки периодического действия	262
Камерные сушилки	262
10. Другие методы сушки	264

Глава тринадцатая. Печи стеклового производства (Д. Б. Гинзбург)

Стекловаренные печи	267
1. Процессы, протекающие в печах	267
2. Типы печей	268
3. Схема работы стекловаренной печи	269
4. Горючие печи	274
Режим работы	275
Устройство	279
Характеристика работы	279
5. Ваннe печи	279
Режим работы	279
Устройство	283
Электрический обогрев печей	295
Характеристика работы	297
6. Основы расчета	298
Определение размеров рабочей камеры горючих печей	298
Определение размеров рабочей камеры ваннe печей	302
Определение расхода топлива	307
Печи для термической обработки стеклинных изделий	310
1. Процесс отжига	310
2. Устройство печей	311
Печи периодического действия	312
Печи непрерывного действия	312
3. Основы расчета	316

Глава четырнадцатая. Печи производства вязких материалов (Е. И. Ходоров)

1. Процесс образования вязких материалов	318
2. Вращающиеся печи	320
Движение материала	322
Теплопередача	325
Горение топлива	328
Вращающиеся печи без дополнительных устройств	334
Вращающиеся печи с устройствами для использования тепла отходящих газов	344

	Холодильники вращающихся печей	352
	Барабанный холодильник	353
	Рекуператорный холодильник	353
	Скребокый колосниковый холодильник	354
	Переталкивающий колосниковый холодильник	356
	Основы расчета вращающихся печей	358
	Основы эксплуатации вращающихся печей	363
3.	Шахтные печи	365
	Шахтные печи для обжига цементного клинкера	367
	Шахтные печи для обжига извести	371
	Шахтные печи для обжига гипса, шамота, доломита и магнезита	378
	Основы расчета шахтных печей	381
4.	Колосниковые решетки для обжига цементного клинкера	385
5.	Вращающиеся барабаны для обезвоживания гипса	387
6.	Варочные котлы для обезвоживания гипса	389
7.	Установки для обезвоживания гипса в процессе размола и во взвешенном состоянии	390

Глава пятнадцатая. Печи керамических производств
(С. Н. Деликишкин)

1.	Процесс обжига керамических изделий	392
2.	Типы печей для обжига формованных изделий	395
3.	Пламенные печи	396
	Печи периодического действия	396
	Печи непрерывного действия	405
	Печи с подвижным составом (туннельные печи)	418
4.	Электрические печи	439
5.	Основы расчета печей	442
6.	Рациональный режим обжига керамических изделий	445

Глава шестнадцатая. Контроль и регулирование работы печей и сушилок (Д. Б. Гинзбург)

1.	Непосредственное наблюдение	452
2.	Аппаратурный контроль	453
	Контроль температур	454
	Контроль давлений	457
	Контроль состава газов	458
	Контроль количества газов	459
	Контроль топлива	460
3.	Расчетный контроль	460
	Содержание в газах отдельных элементов	461
	Определение выхода сухих газов, их влажности и расхода воздуха	461
	Составление материального и теплового балансов и определение к. п. д. печи и сушилки	468
4.	Испытание печей и сушилок	470
5.	Автоматическое регулирование	471
	Литература	477

Редактор *И. Смирнова*

Техн. редактор *Л. Панова*

Сдано в пропав. 11/VII 1949 г. Подп. к печати 26—31/VIII 1949 г. Объем 30,25 п. л. + 4 вкл. Уч.-изд. л. 33,4. Бумага 60×92/16. Л 156180—23/VIII 1949 г. Зак. 1538. Тираж 3 500. Цена 1,8 руб.

16-я типография Главполиграфиздата при Совете Министров СССР.
Москва, Грехпродный, 9.

